

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
імені Ігоря Сікорського**

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕХАНІКА

методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни «Інформативність фізичних процесів»

*Рекомендовано вченою радою
Приладобудівного факультету
(протокол №6.16 від 29.06.2016р.)*

Київ
НТУУ «КПІ»
2016

Експериментальна механіка: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Інформативність фізичних процесів» [Текст] / Уклад.: О.К. Нікітін, В.М. Зайцев. – К.: НТУУ «КПІ», 2016р - 138 с.

Методичні вказівки призначені для студентів, що навчаються за спеціальностями та спеціалізаціями:

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (спеціалізація - комп'ютерно-інтегровані технології та системи точної механіки).

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (спеціалізація – інформаційно-вимірювальні системи та технології точної механіки).

У вказівках наведені необхідні методичні матеріали, що дають можливість студенту підготуватися до виконання лабораторних робіт, виконати необхідні лабораторні роботи, отримати результати, обробити результати, провести їх аналіз та сформулювати висновки.

Експериментальна механіка:
Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни «Інформативність фізичних процесів»

Укладачі: *Нікітін Олександр Костянтинович, доцент, к.т.н.*
Зайцев Віктор Миколайович, старший викладач.

Відповідальний редактор
Гераїмчук Михайло Дем'янович, професор, д.т.н.

Рецензент *Мелешко Владислав Валентинович, доцент, к.т.н.*

За редакцією укладачів

Анотація

Методичні вказівки «Експериментальна механіка: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Інформативність фізичних процесів» призначені для студентів другого рівня підготовки, спеціальностей 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (спеціалізація - комп'ютерно-інтегровані технології та системи точної механіки) та 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (спеціалізація – інформаційно-вимірювальні системи та технології точної механіки).

Методичні вказівки містять матеріали що дають можливість студентам якісно підготуватися до виконання лабораторних робіт, виконати лабораторні роботи, обробити результати, провести їх аналіз та сформулювати висновки. Спрямування методичних вказівок та безпосередньо лабораторних робіт сприяють розвитку у студентів навичок експериментатора.

Аннотация

Методические указания «Экспериментальная механика: Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Информативность физических процессов» предназначена для студентов второго уровня подготовки, специальностей: 151 Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии (специализация – компьютерно – интегрированные технологии и системы точной механики) и 152 Метрология и информационно – измерительная техника (специализация – информационно – измерительные системы и технологии точной механики).

Методические указания содержат материалы, которые позволят студентам качественно подготовиться к выполнению лабораторных работ, выполнить лабораторные работы, обработать и проанализировать полученные конкретные результаты. Направленность методических указаний и непосредственно лабораторных работ способствует развитию у студентов навыков экспериментатора.

Annotation

Guidelines "Experimental Mechanics: Methodical instructions to laboratory works on discipline" Informative physical processes "is designed for students of the second level of training, specialties: 151 Automation and Computer Integrated Technologies (specialization - computer - integrated technologies and precision engineering system) and 152 Metrology and information - measuring equipment (specialization - information - measuring systems and precision engineering technology).

Guidelines contain materials that allow students to properly prepare for the implementation of laboratory work, perform laboratory work, process and analyze the results obtained. The orientation guidelines and laboratory work directly contributes to the development of students' skills ексериментатора.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ, СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
Лабораторна робота №1: Градування рідинних манометрів з видимим рівнем.....	12
Мета лабораторної роботи.....	12
1.1. Об'єкт вивчення.....	12
1.2. Робоче завдання.....	19
1.3. Програма підготовки до виконання лабораторної роботи.....	19
1.4. Опис лабораторної установки.....	21
1.5. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи.....	22
1.6. Статистична обробка результатів вимірювань.....	23
1.7. Зміст звіту з виконання лабораторної роботи.....	24
Рекомендована література.....	24
Лабораторна робота №2: Градування деформаційного трубчато- пружинного манометра за допомогою вантажопоршневого манометра.....	25
Мета лабораторної роботи.....	25
2.1. Об'єкт вивчення.....	25
2.2. Робоче завдання.....	29
2.3. Програма підготовки до виконання лабораторної роботи.....	29
2.4. Опис лабораторної установки.....	30
2.5. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи.....	30
2.6. Статистична обробка результатів вимірювань.....	32
2.7. Зміст звіту з виконання лабораторної роботи.....	33
Рекомендована література.....	33
Лабораторна робота №3: Вивчення та градування вимірювального перетворювача різниці тисків	34
Мета лабораторної роботи.....	34
3.1. Об'єкт вивчення.....	34

3.2.	Робоче завдання.....	39
3.3.	Програма підготовки до виконання лабораторної роботи.....	39
3.4.	Опис лабораторної установки.....	40
3.5.	Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи.....	42
3.6.	Статистична обробка результатів вимірювань.....	44
3.7.	Зміст звіту з виконання лабораторної роботи.....	45
	Рекомендована література.....	45
Лабораторна робота №4: Градування витратоміра із звужуючим пристроєм.....		46
	Мета лабораторної роботи.....	46
4.1.	Об'єкт вивчення.....	46
4.2.	Робоче завдання.....	47
4.3.	Програма підготовки до виконання лабораторної роботи.....	47
4.4.	Опис лабораторної установки.....	47
4.5.	Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи.....	49
4.6.	Статистична обробка результатів вимірювань.....	50
4.7.	Зміст звіту з виконання лабораторної роботи.....	51
	Рекомендована література.....	51
Лабораторна робота №5: Градування ротаметра з місцевою шкалою.....		52
	Мета лабораторної роботи.....	52
5.1.	Об'єкт вивчення.....	52
5.2.	Робоче завдання.....	53
5.3.	Програма підготовки до виконання лабораторної роботи.....	53
5.4.	Опис лабораторної установки.....	54
5.5.	Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи.....	56
5.6.	Статистична обробка результатів вимірювань.....	57
5.7.	Зміст звіту з виконання лабораторної роботи.....	59
	Рекомендована література.....	59

Лабораторна робота №6: Визначення витрат повітря за допомогою напірної трубки Піто.....	60
Мета лабораторної роботи.....	60
6.1. Об'єкт вивчення.....	60
6.2. Робоче завдання.....	60
6.3. Програма підготовки до виконання лабораторної роботи	60
6.4. Опис лабораторної установки.....	61
6.5. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи.....	62
6.6. Статистична обробка результатів вимірювань.....	65
6.7. Зміст звіту з виконання лабораторної роботи.....	68
Рекомендована література	68
Лабораторна робота №7: Вивчення та градування тензорезисторного стрижневого вимірювального перетворювача тиску.....	69
Мета лабораторної роботи	69
7.1. Короткі теоретичні відомості	69
7.2. Робоча схема	81
7.3. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи	84
7.4. Зміст звіту з виконання лабораторної роботи	86
7.5. Контрольні питання	87
Рекомендована література	87
Лабораторна робота №8: Вивчення та градування напівпровідникового мембранного тензорезисторного вимірювального перетворювача тиску.....	88
Мета лабораторної роботи.....	88
8.1. Загальні відомості про мембранні напівпровідникові тензорезисторні ВПТ.....	88
8.2. Робоча схема.....	97
8.3. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи.....	99
8.4. Зміст звіту з виконання лабораторної роботи.....	101

8.5. Контрольні питання.....	101
Рекомендована література	102
Лабораторна робота №9: Дослідження температурних похибок тензорезисторних вимірювальних перетворювачів тиску	103
Мета лабораторної роботи.....	103
9.1. Загальні відомості про температурні похибки тензорезисторних ВПТ і методи їх корекції.....	103
9.2. Робоча схема.....	111
9.3. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи.....	111
9.4. Зміст звіту з виконання лабораторної роботи.....	114
9.5. Контрольні питання.....	115
Рекомендована література	115
Лабораторна робота №10: Градування електричного компенсацій- ного манометра за допомогою автоматичного задавача тиску.....	116
Мета лабораторної роботи.....	116
10.1. Загальні відомості про електричні компенсаційні манометри ї автоматичні задавача тиску.....	116
10.2. Робоча схема.....	123
10.3. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи.....	124
10.4. Зміст звіту з виконання лабораторної роботи.....	126
10.5. Контрольні питання.....	126
Рекомендована література	126
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	127
ДОДАТОК А Правила оформлення звіту з виконання лабораторної роботи.....	128
ДОДАТОК Б Приклад оформлення титульного аркушу.....	133
ДОДАТОК В Визначення параметрів емпіричних залежностей методом найменших квадратів.....	134

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ, СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Вимірювальний прилад – засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Вимірювальний перетворювач – вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення.

Первинний вимірювальний перетворювач; сенсор – вимірювальний перетворювач, який першим взаємодіє з об'єктом вимірювання.

Засіб вимірювань – засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань.

Засіб вимірювальної техніки – технічний засіб, який застосовується під час вимірювань та має нормовані метрологічні характеристики.

АЗТ-автоматичний задавач тиску;

ВПРТ – вимірювальний перетворювач різниці тисків;

ВПТ- вимірювальний перетворювач тиску;

ВПТ (ИВД) - вимірювач повітряних тисків (измеритель воздушных давлений);

ДТВП – диференціально-трансформаторний вимірювальний перетворювач;

КЕВПТ- компенсаційний електричний вимірювальний перетворювач тиску;

КНС-структура – кремній на сапфірі-структура;

ЛАТР – лабораторний автотрансформатор;

ТКО – температурний коефіцієнт опору;

ЧЕ – чутливий елемент;

Р – тиск;

К – стала приладу;

L – переміщення вільної поверхні рідини в трубці відносно нульової поділки;

ρ – густина;

α – кут нахилу вимірювальної трубки мікроманометра;

h – висота положення вільної поверхні рідини у трубці;
 a_0 – ордината точки перетину графіка з віссю ординат;
 a_1 – тангенс кута між графіком (пряма лінія) та віссю абсцис;
 $Q, (q_v)$ – об’ємна витрата;
 $Q_m, (q_m)$ – масова витрата;
 ΔP – різниця тисків;
 V – об’єм;
 ΔV – різниця об’ємів;
 P_∂ – динамічний тиск;
 v – швидкість потоку;
 S – площа.

ВСТУП

Дані методичні рекомендації є складовою частиною навчально – методичних документів з дисципліни «Інформативність фізичних процесів». Вони безпосередньо відносяться до методичного забезпечення лабораторних занять – занять на яких студенти під керівництвом викладача проводять натурні експериментальні дослідження з метою практичного підтвердження окремих теоретичних положень, набувають практичних навичок роботи з лабораторним обладнанням, вимірювальною апаратурою, оволодівають методикою експериментальних досліджень та обробки отриманих результатів.

Експериментальна механіка – це галузь механіки, що займається розробкою методів експериментального визначення параметрів процесів в пружних конструкціях, гідростатиці та гідродинаміці. Дослідження проводяться на натурних конструкціях в умовах реальних процесів взаємодії та з використанням моделей. Методи експериментальної механіки базуються на використанні різноманітних фізичних принципів, явищ, законів.

Експериментальні дослідження відіграють суттєву роль під час розробки, конструювання та виробництва засобів вимірювальної техніки. Тому фахівці в галузі автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій, метрології та інформаційно-вимірювальної техніки повинні володіти початковими практичними навичками в питаннях експериментальних досліджень.

В даних методичних рекомендаціях положення експериментальної механіки застосовуються з метою визначення інформативної ефективності процесів взаємодії. Студенти знайомляться з експериментальними методами визначеннями ряду параметрів, самостійно використовують сучасні засоби вимірювальної техніки. Суттєвим моментом виконання лабораторних робіт з використанням даних методичних рекомендацій є обов'язкове використання статистичних методів обробки результатів вимірювань.

Укладачі мають надію, що методичні рекомендації послужать

формуванню у студентів практичних навиків експериментатора в області інформативної механіки.

Правила оформлення звіту з виконання лабораторних робіт наведені в **Додатку А.**

Правила оформлення титульного аркуша звіту з виконання лабораторних робіт наведені в **Додатку Б.**

Визначення параметрів емпіричних залежностей методом найменших квадратів наведено в **Додатку В.**

Лабораторна робота № 1

Градування рідинних манометрів з видимим рівнем

Мета лабораторної роботи

Метою лабораторної роботи є:

- 1) вивчити принцип дії та конструкції рідинних манометрів з видимим рівнем;
- 2) набути практичні навички в роботі з рідинними манометрами з видимим рівнем;
- 3) набути практичні навички градування рідинних манометрів з видимим рівнем;
- 4) набути практичні навички обробки та представлення результатів лабораторних вимірювань.

1.1. Об'єкт вивчення

Об'єктом вивчення в лабораторній роботі є рідинні манометри з видимим рівнем: двотрубний манометр, мікроманометр з похилою трубкою та мікроманометр компенсаційний.

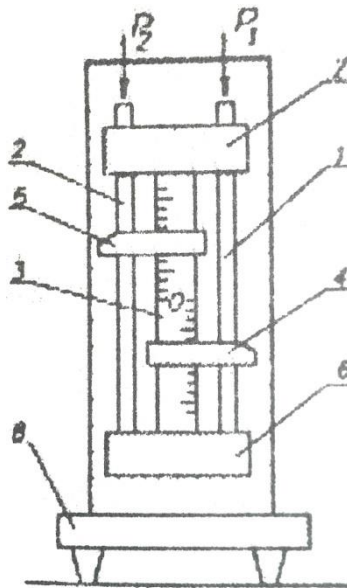


Рис. 1.1. Двотрубний рідинний манометр

Рідинними манометрами називаються манометри, в яких вимірювальний тиск або різниця тисків зрівноважується тиском, який утворюється вагою стовпця рідини.

Рідинними манометрами з видимим рівнем називаються манометри, в яких вимірювальний тиск або різниця тисків визначається за різницею рівнів рідини в двох сполучених посудинах, з яких одна або обидві виготовлені з прозорого матеріалу.

Двотрубний манометр. Двотрубним манометром називається рідинний манометр, в якому обидві сполучені посудини мають близькі по розміру площі поперечних перерізів. Схему двотрубного рідинного манометра наведено на рис. 1.1.

Цей манометр іноді називають U – образним. Він призначений для вимірювання надмірного тиску (P_n), вакууметричного тиску (P_v) та різниці двох тисків (ΔP).

Манометр складається з двох вертикальних скляних трубок 1 і 2, шкали 3, двох показників 4 і 5, нижнього та верхнього блоків 6 і 7, основи 3. Скляні трубки сполучаються між собою через внутрішній канал в нижньому блоці. Скляні трубки та з'єднувальний канал заповнені зрівноважуючою рідиною – дистильованою водою. Вільні поверхні рідини в трубках при рівних тисках P_1 та P_2 повинні знаходитися на рівні нульової поділки шкали.

Шкала приладу має міліметрові поділки в діапазоні ± 140 мм. На кінцях шкали виконані поздовжні пази, які дозволяють зсувати шкалу відносно трубок в діапазоні ± 10 мм.

По шкалі пересуваються два показника, які призначені для точного визначення положення вільних поверхонь рідини в трубках відносно нульової поділки шкали.

Тиск, який приймає участь в процесі вимірювання, подається в об'єми трубок, розташованих над вільними поверхнями рідини. Більший тиск (P_1) підводиться в додатну трубку 1, менший (P_2) – у від'ємну трубку 2.

Висоту стовпця рідини, що відповідає різниці тисків $\Delta P = P_1 - P_2$, визначають шляхом додавання рівнів рідини у двох трубках відносно нульової поділки шкали.

При вимірюванні надмірного тиску у від'ємну трубку подається атмосферний тиск P_a . При вимірюванні вакууметричного тиску P_a подається в додатну трубку.

Конструктивне оформлення двотрубних рідинних манометрів залежить від верхньої межі статичного тиску для приладу. За цією ознакою двотрубні рідинні диференціальні манометри з видимим рівнем діляться на три групи: низького [до(0,05...0,1) МПа], середнього [до(4...6) МПа] та високого до [(20...25) МПа] тиску.

Диференціальні манометри для середнього та високого тисків відрізняють конструктивні особливості, які забезпечують необхідну міцність конструкції та полегшують з'єднання, продувку трубок, що підводять тиск до приладу. Випускаються диференціальні манометри на граничний тиск 0,5 МПа (тип ДТ-5), 5 МПа (тип ДТ-50), 15 МПа (тип ДТ-150). Граничний вимірювальний перепад тиску в диференціальних манометрах складає 700 мм рт.ст. (ДТ-5), 500 мм рт.ст. (ДТ-50, ДТ-150).

Манометр з похилою трубкою відноситься до однострубних рідинних манометрів з видимим рівнем. Однострубним манометром називається манометр в якому площа перерізу однієї з посудин, що сполучаються, значно менше площі перерізу іншої.

Мікроманометри призначені для вимірювання різниці тисків, що складають одиниці та десятки . міліметрів висоти стовпця рідини, яка зрівноважує.

В лабораторній роботі вивчається мікроманометр з похилою трубкою типу ММН-2400(5)-1,0. Такий прилад є багатомежевим лабораторним мікроманометром із змінним кутом нахилу вимірювальної трубки. Мікроманометр дозволяє вимірювати надмірний тиск, розрідження та різницю

тисків у межах 5 інтервалів. Схему манометра з похилою трубкою наведено на рис. 1.2.

Мікроманометр включає широку посудину (чашку) 1, вимірювальну трубку 2, з'єднувальну гнучку трубку 3, дугоподібний кронштейн 4, фіксатор (на рисунку не показано), основу 5, регульовані опори 6, рівень 7, коректор 8 нульового рівня рідини. Поділки міліметрової шкали нанесені на поверхню вимірювальної трубки. За допомогою фіксатора вимірювальна трубка може фіксуватися у 5 різних кутових положеннях. Кожному кутовому положенню трубки відповідає визначене значення сталої K приладу та визначений діапазон вимірювання:

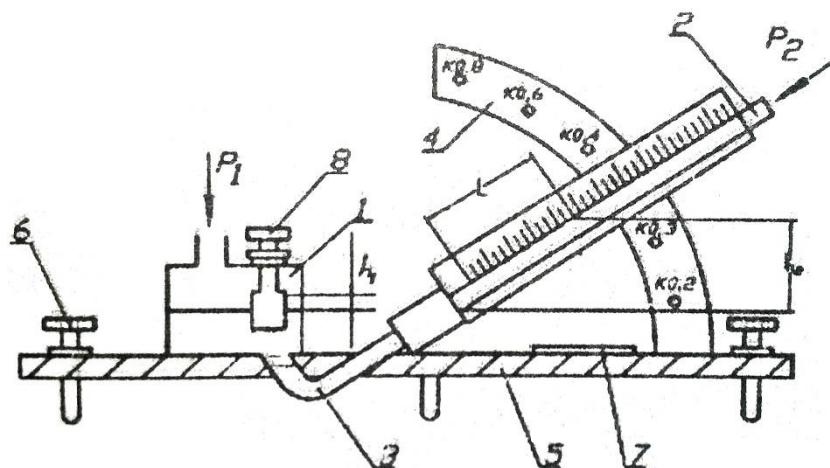


Рис. 1.2. Мікроманометр з похилою трубкою

$K=0,2 \Rightarrow (0 \dots 50) \text{ кГс/м}^2 \text{ (0...500)Па;}$

$K=0,3 \Rightarrow (0 \dots 75) \text{ кГс/м}^2 \text{ (0...750)Па;}$

$K=0,4 \Rightarrow (0 \dots 100) \text{ кГс/м}^2 \text{ (0...1000)Па;}$

$K=0,6 \Rightarrow (0 \dots 150) \text{ кГс/м}^2 \text{ (0...1500)Па;}$

$K=0,8 \Rightarrow (0 \dots 200) \text{ кГс/м}^2 \text{ (0...2000)Па.}$

Значення сталої приладу вказані біля відповідних отворів на дугоподібному кронштейні. Установка вимірювальної трубки у необхідне положення здійснюється за допомогою фіксатора, шток якого під дією пружини

входить в один із отворів. Робочою рідиною (заповнювачем) є етиловий спирт. Густина етилового спирту $\rho = 0,8095 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Робочу рідину заливають у широку посудину. При рівних тисках P_1 та P_2 рівень рідини в вимірювальній трубці повинен співпадати з нульовою поділкою шкали незалежно від кутового положення трубки. Установка рівня рідини на нульову поділку шкали при зміні кута нахилу трубки здійснюється за допомогою коректора, шляхом його обертання.

Зменшення кута нахилу вимірювальної трубки приводить до збільшення чутливості мікроманометра та зменшення похибки вимірювань.

Елементи приладу розташовані на основі з двома рівнями та двома опорами, що регулюються. За допомогою рівнів та опор, що регулюються, забезпечується горизонтальна установка мікроманометра в двох взаємно перпендикулярних площинах.

При вимірюванні різниці двох тисків, надмірного тиску або розрядження більший тиск подається з чашку, менший в трубку.

Величина вимірювальної різниці тисків визначається за формулою:

$$\Delta P = K \cdot L,$$

де K – стала приладу;

L – переміщення вільної поверхні рідини в трубці відносно нульової поділки.

Стала приладу визначається за формулою:

$$K = \rho \cdot \sin \alpha.$$

де ρ – густина робочої рідини;

α – кут нахилу вимірювальної трубки.

Мікроманометри з похилою трубкою мають клас точності 0,5 або 1,0.

Мікроманометр компенсаційний є одним з найбільш точних рідинних манометрів з видимим рівнем. Призначений для вимірювання надмірного тиску,

розрядження та різниці тисків повітря і неагресивних газів. Призначений для повірки інших рідинних манометрів, зокрема двотрубних та мікроманометрів з похилою трубкою.

В лабораторній роботі вивчається та застосовується мікроманометр компенсаційний типу ММ-250 кл.0,025. Схему такого мікроманометра наведено на рис. 1.3.

В мікроманометрі використовуються:

- компенсаційний метод вимірювання тиску для виключення впливу неправильної геометричної форми посудин та капілярних сил, який полягає у вимірюванні різниці двох тисків шляхом піднімання від'ємної рухомої посудини;
- мікрометричний гвинт, шкала, ноніус для здійснювання піднімання від'ємної посудини та вимірювання величини цього піднімання;
- оптичний пристрій для точної установки рівня в додатній посудині.

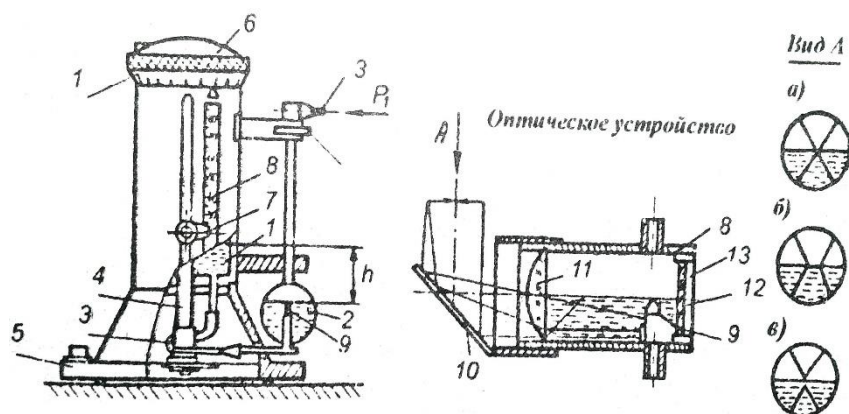


Рис. 1.3. Мікроманометр компенсаційний

Мікроманометр складається з двох посудин – від'ємної 1 та додатної 2, які сполучаються за допомогою гумової трубки 3. В центрі посудини 1 є різьбовий отвір, через який проходить мікрометричний гвинт 4. Нижній кінець мікрометричного гвинта шарнірно з'єднано зі станиною приладу 5, а верхній – жорстко з головкою 6. При обертанні головки 6 обертається мікрометричний гвинт 4 і від'ємна посудина 1 зсувається вертикально вгору або вниз в залежності

від напрямку обертання.

При вертикальному зсуві від'ємної посудини зсувається показник 7 відносно вертикальної шкали 8. Показник жорстко з'єднано з рухомою від'ємною посудиною. На нижню конічну частину головки нанесено кругову шкалу. Діапазон шкали, що відповідає одному оберту головки, складає 0-100, 0-100. Тобто шкала складається з двох піддіапазонів, кожний з яких знаходиться у межах кутів, рівних 180° . Один повний оберт головки приладу відповідає вертикальному зсуву показника 7 відносно шкали 8 на величину 2 мм. Отже, одна поділка кругової шкали відповідає 0,01 мм вертикального зсуву показника вертикальної шкали.

При проведенні вимірювань відлік проводиться за двома шкалами: ціле число міліметрів визначається за вертикальною шкалою 8, а десяті та соті частини міліметра – за конічною кільцевою шкалою. Оптичний пристрій мікроманометра призначений для визначення положення вільної поверхні рідини в додатній посудині відносно вершини візирного стержня. Оптичний пристрій складається з візирного стержня 9, дзеркала 10, лінзи 11, матового скла 12, відбивача 13. При співпаданні вільної поверхні рідини з вершиною візирного стержня оператор при спостереженні буде бачити картину, яку представлено на рис. 1.3а – вершина візирного стержня дотикається вершини відбивання візирного стержня від вільної поверхні рідини. Якщо рівень рідини в додатній посудині знижується – вільна поверхня рідини опускається нижче вершини візирного стержня. Картину, яку при цьому спостерігає оператор, показано на рис. 1.3б. При розташуванні вільної поверхні рідини у від'ємній посудині вище вершини візирного стержня картина, яку спостерігає оператор, показано на рис. 1.3в.

При проведенні вимірювань більший тиск подається в додатну посудину, менший у від'ємну посудину. Знімання показань з вертикального та кільцевого відлікових пристроїв проводяться після співпадань вершин візирного стержня та його відбивання, тобто після одержування картини, рис. 1.3а.

Співпадання вершин візирного стержня та його відбивання досягається шляхом обертання головки з кільцевою шкалою в одному чи іншому напрямі.

1.2. Робоче завдання

Визначити експериментально:

- характеристику градуювання двотрубного рідинного манометра;
- характеристику градуювання мікроманометра з похилою трубкою для двох фіксованих положень трубки ($K=0,2$ та $K=0,6$).

1.3. Програма підготовки до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити по конспекту лекцій та рекомендованій літературі матеріали про рідинні манометри з видимим рівнем.
2. Для запису вихідних результатів вимірювань підготувати таблиці виду 1.1. та 1.2.

Таблиця 1.1

Результати вихідних вимірювань при градуюванні двотрубного рідинного манометра

Р _{зр} мм вод. ст.	1-й цикл						2-й цикл						3-й цикл						Сер. знач. h _{ср} , мм
	Пр. хід			Звор. хід			Пр. хід			Звор. хід			Пр. хід			Звор. хід			
	h ₁	h ₂	h	h ₁	h ₂	h	h ₁	h ₂	h	h ₁	h ₂	h	h ₁	h ₂	h	h ₁	h ₂	h	
0																			
10																			
20																			
·																			
·																			
·																			
70																			

h_1, h_2, h – вимірюємо в мм.

$$h_{\text{ср.}} = \frac{\sum_{i=1}^6 h}{6},$$

$$h = h_1 + h_2;$$

де h_1 – висота положення вільної поверхні рідини у першій (додатній) трубці;

h_2 – висота положення вільної поверхні рідини у другій (від'ємній) трубці.

Таблиця 1.2

Результати вихідних вимірювань при градуюванні мікроманометра з похилою трубкою

L, мм								
К	Р _{зр} мм вод. ст.	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл		Сер. знач.
		Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	
0,2	0							
	10							
	·							
	50							
0,6	0							
	10							
	·							
	50							

Пр. хід - прямий хід – вимірювальний тиск ступінчасто збільшується.

Звор. хід - зворотній хід – вимірювальний тиск ступінчасто зменшується.

Р_{зр.} - зразковий тиск – показання компенсаційного манометра

1.4. Опис лабораторної установки

Принципову схему лабораторної установки показано на рис 1.4.

До складу лабораторної установки входять: мікроманометр компенсаційний 1, мікроманометр з похилою трубкою 2, двотрубний манометр 3, задавач тиску 4, пневмозамок 5. Прилади та елементи лабораторної роботи з'єднані між собою гнучкими гумовими трубками.

Задавач тиску призначений для створення у вимірювальній пневмомережі необхідного тиску. Основним робочим елементом задавача тиску є сильфон - тонкостінний циліндричний пружний елемент з глибокими поперечними гофрами. Внутрішній об'єм сильфона з'єднано з пневмосистемою. При стисненні сильфону повітря з нього витискується в пневмомережу і тиск в ній підвищується. Стиснення сильфону здійснюється при обертанні ручки задавача тиску у напрямі руху годинникової стрілки.

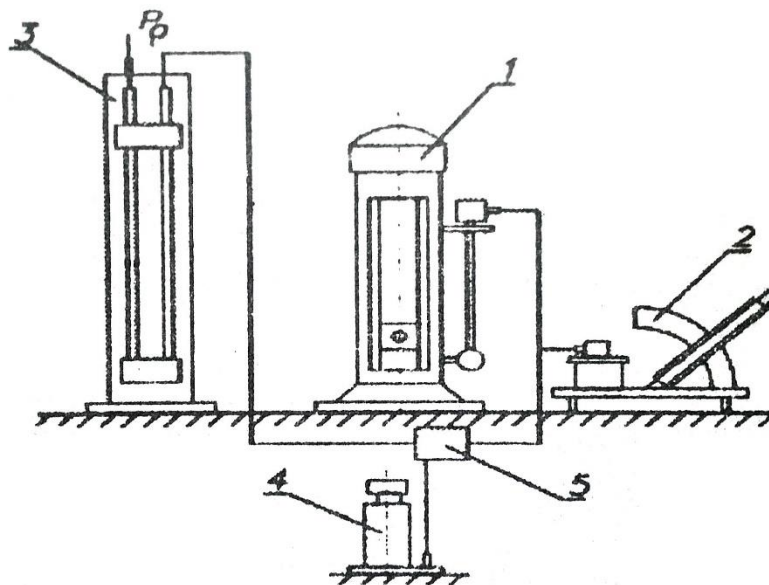


Рис. 1.4. Принципова схема лабораторної установки

Пневмозамок призначений для з'єднання трубок, які підводять тиск до вимірювальних приладів, і трубки від сильфонного задавача тиску.

Для зрівноваження тиску в додатніх камерах усіх вимірювальних приладів та середині сильфону необхідно від пневмозамка від'єднати одну з трубок. При цьому тиск скрізь стане рівним атмосферному.

1.5. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи

Рекомендується виконувати лабораторну роботу за наступною послідовністю:

1. Від'єднати від пневмозамка одну із з'єднувальних трубок. Обертанням ручки встановити сильфонний задавач тиску у вихідне положення. Встановити мікроманометр компенсаційний у вихідне (нульове) положення. Встановити трубку мікроманометра з похилою трубкою у положення, яке відповідає $k=0,2$. Переконавшись, що рівень рідини усіх приладів співпадають з нульовими поділками шкал. Приєднати до пневмозамка з'єднувальну трубку.

2. Внести у таблиці виду 1.1. і 1.2. відповідні значення h і L , які визначають положення вільних поверхонь рідин у трубках при нульових різницях тисків.

3. Обертанням головки мікроманометра компенсаційного встановити показник вертикальної шкали на поділку 10. При цьому показник кругової шкали повинен співпадати з нульовою поділкою.

4. Плавним та повільним обертанням ручки сильфонного задавача тиску забезпечити сполучення вільної поверхні рідини у додатній посудині компенсаційного мікроманометра з вершиною візирного стержня (див. рис. 1.3а).

5. Зняти показання з двотрубного манометра (визначити h_1 і h_2) та мікроманометра з похилою трубкою (визначити L) при $k=0,2$ і $k=0,6$ і занести одержані результати у відповідні таблиці виду 1.1. і 1.2.

6. Послідовно, ступінчатого зсуваючи угору показник вертикальної шкали компенсаційного мікроманометра на поділки 20, 30, ..., 50, продовжувати знімати показання з вимірювальних приладів (прямий хід).

7. Послідовно, ступінчасто зсуваючи униз показник вертикальної шкали компенсаційного мікроманометра на поділки 40, 30, ..., 0 і знімати показання з

вимірювальних приладів (зворотній хід).

8. Прямий та зворотній хід складають один цикл вимірювань. Кількість циклів вимірювань повинно бути не менше 3.

1.6. Статистична обробка результатів вимірювань

1. За даними таблиць 1.1. та 1.2. обчислити і внести у відповідні стовпці цих таблиць значення $h = h_1 + h_2$, $h_{\text{ср}}$, $L_{\text{ср}}$.

2. В системі координат $P_{\text{зр.}} - h$ ($P_{\text{зр.}}$ – вісь абсцис, h – вісь ординат) нанести точки, які відповідають парним значенням ($P_{\text{зр. } i}$ $h_{\text{ср. } i}$). Одержані точки між собою не з'єднувати.

3. Обробити результати вимірювання методом найменших квадратів.

Вихідну функціональну залежність взяти у вигляді:

$$h = a_0 + a_1 \cdot P_{\text{зр.}} \quad (*)$$

4. В системі координат ($P_{\text{зр.}} - h$) провести пряму, яка відповідає одержаній функціональній залежності вигляду (*) з обчисленими значеннями a_0 і a_1 .

5. Обчислити оцінку стандартного відхилення коефіцієнта a_1 та інтервал, в якому із заданою ймовірністю може знаходитися дійсне значення тангенса кута нахилу до осі абсцис шуканої прямої (коефіцієнт a_1).

6. В одній системі, координат $P_{\text{зр.}} - L$ ($P_{\text{зр.}}$ – вісь абсцис, L – вісь ординат) нанести точки, які відповідають парним значенням ($P_{\text{зр. } i} - L_i$) для $k=0,2$ і $k=0,6$. Одержані точки між собою не з'єднувати.

7. Обробити результати вимірювань за методом найменших квадратів. За вихідні функціональні залежності для $k=0,2$ і $k=0,6$ взяти залежність виду:

$$L = a_0 + a_1 \cdot P_{\text{зр.}} \quad (**)$$

8. В системі координат ($P_{\text{обр.}} - L$) провести дві прямі, які відповідають одержаним функціональним залежностям виду (**). Біля прямих записати аналітичні залежності виду (**) з обчисленими значеннями a_0 і a_1 .

9. Обчислити оцінку стандартного відхилення коефіцієнтів a_1 (для $k=0,2$ і $k=0,6$) та інтервали, в яких із заданою ймовірністю повинні знаходитися дійсні значення тангенсів кутів нахилу до осі абсцис шуканих прямих (коефіцієнти a_1).

1.7. Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

Звіт про виконання лабораторної роботи повинен включати наступні розділи:

1. Мета лабораторної роботи.
2. Короткі теоретичні відомості про рідинні манометри з видимим рівнем та їх принципові схеми.
3. Принципова схема лабораторної установки та її опис.
4. Результати вимірювань, включаючи їх обробку методом найменших квадратів, та побудову графіків.

Рекомендована література: [12, 14]

Лабораторна робота № 2

Градування деформаційного трубчато-пружинного манометра за допомогою вантажопоршневого манометра

Мета лабораторної роботи

Метою лабораторної роботи є:

- 1) вивчити принцип дії, основи теорії та конструкцію вантажопоршневого манометра (приладу з не ущільненим поршнем);
- 2) вивчити принцип дії та конструкцію деформаційного трубчато-пружинного манометра;
- 3) набути практичні навички в роботі з вантажопоршневими манометрами;
- 4) набути практичні навички градування деформаційних манометрів;
- 5) набути практичні навички в обробці та представленні результатів лабораторних вимірювань.

2.1. Об'єкт вивчення

Об'єктом вивчення в даній лабораторній роботі є вантажопоршневі манометри і деформаційні трубчато-пружинні манометри.

Вантажопоршневі манометри (прилади з не ущільненим поршнем) призначені для завдання та вимірювання тиску. Принцип їх дії заснований на зрівноважуванні тиску, що вимірюється, тиском поршня та вантажів.

В лабораторній роботі застосовується вантажопоршневий манометр типу МП-2500. Схему такого манометра наведено на рис. 2.1. Вантажопоршневий манометр складається з вимірювальної колонки ВК, скальчатого насоса СН, гвинтового гідравлічного преса ГП, двох колонок К1 та К2, ємності для робочої рідини ЕМ, засувних вентилів В1,...,В5, з'єднувальних трубопроводів Т1 та Т2; трьох зворотних клапанів ОК1, ОК2, ОК3 та основи ОС.

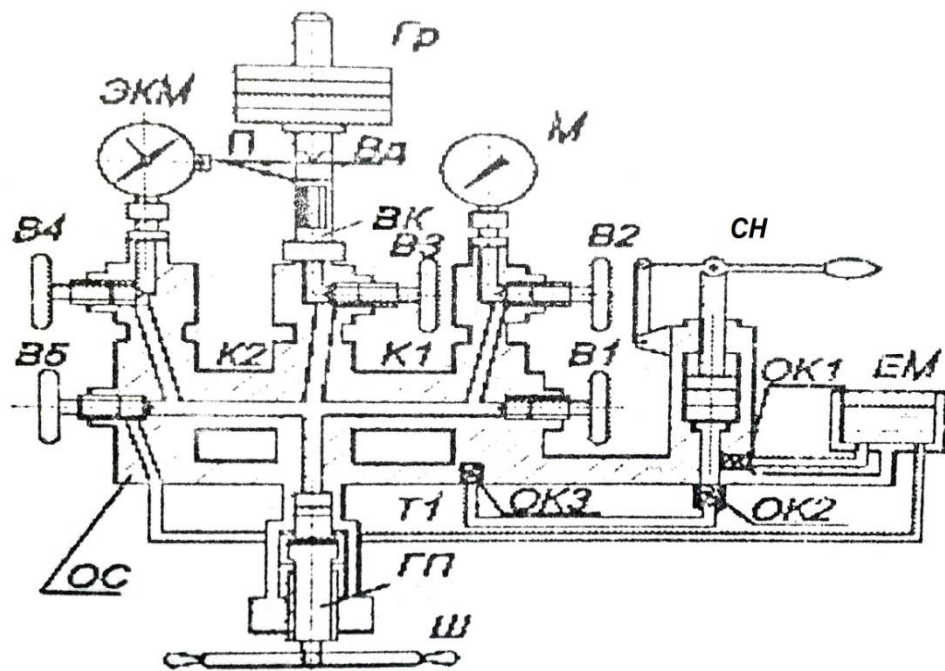


Рис. 2.1. Схема вантажопоршневого манометра типу МП-2500

Вимірювальна колонка є основним елементом вантажопоршневого манометра. В даному манометрі використовується вимірювальна колонка конструкції інженера П. В. Індрика, схему якої наведено на рис. 2.2. В конструкції застосовано принцип розміщення навантаження зверху, а також простий поршень.

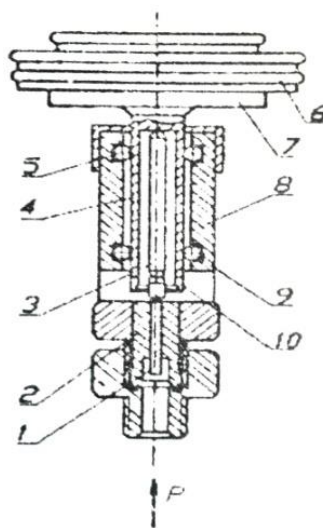


Рис. 2.2. Схема вимірювальної колонки конструкції інженера П.В. Індрика

Простий поршень 1 знаходиться в циліндрі 2 та сприймає вагу вантажів через штангу 3, яка знаходиться в трубці 4. Верхня частина труби – це вантажоприймальний пристрій 7, на якому розміщуються зрівноважуючі вантажі 6. Труба закріплена в двох радіальних шарикопідшипниках 5 і 9.

Конструкція корпусу вимірювальної колонки забезпечує достатню поздовжню стійкість вантажопередавальним елементам та дозволяє здійснювати обертання поршня рукою. Безпосередньо передача обертання від трубки до поршня здійснюється через повідкову муфту 10. Така конструкція вимірювальної колонки дозволяє застосувати прості поршні малого діаметра для завдання та вимірювання високих тисків. Площа поршня вимірювальних колонок конструкції П.В. Індрика складає 5 мм^2 ($d \approx 2,5\text{ мм}$).

Скальчатий насос призначений для заповнення внутрішніх порожнин приладів робочою рідиною та створення початкового тиску в системі гвинтового гідравлічного преса.

Гвинтовий гідравлічний прес призначений для плавної зміни тиску в гідросистемі.

Колонки призначені для установки засобів вимірювання тиску, які треба градуювати або повірити.

Призначення вентилів:

В1 – перекриває напірну магістраль скальчатого насоса;

В2 – перекриває гідравлічний канал першої (правої) колонки;

В3 – перекриває гідравлічний канал вимірювальної колонки;

В4 – перекриває гідравлічний канал другої (лівої) колонки;

В5 – перекриває канал скидання тиску.

Зворотні клапани призначені для забезпечення руху робочої рідини в з'єднувальних каналах та трубопроводах тільки в одному (заданому) напрямі.

Деформаційні трубчато-пружинні манометри призначені для вимірювання тисків рідин та газів.

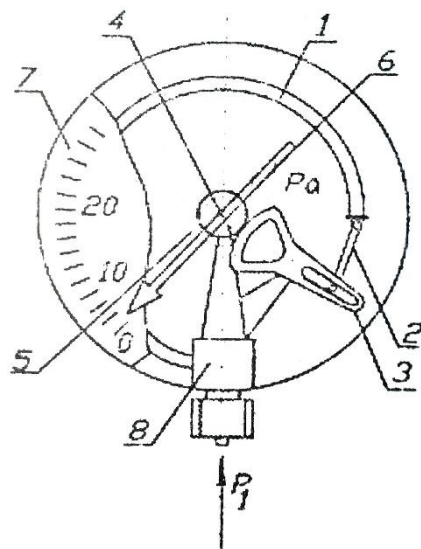


Рис. 2.3. Схема деформаційного трубчато-пружинного манометра

Схему деформаційного трубчато-пружинного манометра, який необхідно проградуювати, наведено на рис. 2.3. Основними елементами манометра є: манометричний пружний елемент (трубчата пружина Бурдона) 1, тяга 2, зубчастий сектор 3, зубчасте колесо (трібка) 4, пружина спіральна (волосок) 5, стрілка 6, шкала 7, корпус 8.

Більший тиск P_1 подається у внутрішню порожнину трубчатої пружини. На зовнішні поверхні трубчатої пружини діє атмосферний тиск P_a . В результаті дії цих тисків трубчата пружина деформується, її вільний кінець переміщується і через тягу повертає на деякий кут зубчастий сектор. Зубчастий сектор знаходиться в зачепленні з зубчастим колесом. При повороті сектора повертається на деякий кут зубчасте колесо. На вихідній частині осі зубчастого колеса жорстко закріплена стрілка. При повороті зубчастого колеса стрілка повертається відносно нерухомої шкали. Кут повороту стрілки пропорційний величині надмірного тиску $P_n = P_1 - P_a$.

Встановлені співвідношення елементів конструкції деформаційних трубчато-пружинних манометрів забезпечують при максимальному значенні надмірного тиску, що вимірюється, поворот зубчастого сектора відносно його початкового положення на кут порядку $20^\circ, \dots, 30^\circ$, поворот зубчастого колеса та

стрілки – на кут $270^\circ, \dots, 300^\circ$. Для усунення зазорів в з'єднаннях кінематичного ланцюга: трубчата пружина – зубчастий сектор – зубчасте колесо застосовується багатовиткова спіральна пружина 5.

2.2. Робоче завдання

Визначити експериментально характеристику градуювання деформаційного трубчато-пружинного манометра.

2.3. Програма підготовки до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити матеріали про вантажопоршневі манометри (прилади з неущільненим поршнем) за конспектом лекцій та рекомендованою літературою.
2. Для запису результатів вимірювань підготувати таблицю виду 2.1.
3. Вивчити по конспекту та рекомендованій літературі матеріали про деформаційні трубчато-пружинні манометри.

Таблиця 2.1.

Результати вихідних вимірювань при градуюванні деформаційного трубчато-пружинного манометра

Р дф, кгс/см ²							
Рвп, кгс/см ²	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл		Сер. знач.
	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	
0							
10							
20							
.							
.							
.							
80							

$P_{\text{вп}}$ – тиск, який задається за допомогою вантажопоршневого манометра;
Пр. хід - прямий хід – тиск, що задається, ступінчастим збільшенням;
Звор. хід - зворотній хід – тиск, що задається, ступінчастим зменшенням.

2.4. Опис лабораторної установки

В лабораторній роботі використовується вантажопоршневий манометр, схему якого наведено на рис. 2.1. Деформаційний трубчато-пружинний манометр, який потрібно градуювати, встановлено на першій (правій) колонці.

2.5. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи

Рекомендується виконувати лабораторну роботу за наступною послідовністю:

1. Плавним обертанням ручок у напрямі, який співпадає з напрямом обертання годинникової стрілки, до упору закрити усі вентиля вантажопоршневого манометра. Плавним обертанням ручок у напрямі проти руху годинникової стрілки відкрити на 0,5 оберту усі вентиля.

Обертанням штурвала у напрямі проти руху годинникової стрілки до упору встановити плунжер гідравлічного преса у вихідне положення.

2. Внести в таблицю (1-й цикл, прямий хід) значення $P_{\text{дф}}$, яке відповідає $P_{\text{вп}}=0$.

3. Плавним обертанням ручок до упору закрити вентиля В4 і В5. За допомогою скальчатого насоса заповнити робочою рідиною магістралі та внутрішні порожнини приладів, створити попередній тиск (5 ± 1) кГс/см². Закрити вентиль В1. Вручну привести поршень до обертання. Плавним обертанням у напрямі руху годинникової стрілки штурвала гідравлічного преса встановити поршень вимірювальної колонки в межах робочого ходу. Знаходження поршня в

межах робочого ходу визначається знаходженням двогранної вершини Вд вантажопоршневого пристрою в межах між двома кільцевими поділками п, покритими червоною емаллю. Відстань між кільцевими поділками визначає величину робочого ходу поршня. При відсутності на вантажоприймальному пристрої вантажів і знаходженні поршня в межах робочого ходу тиск під поршнем, а відповідно в усьому об'ємі, який заповнений робочою рідиною, в тому числі і в внутрішній порожнині трубчатої пружини деформаційного манометра дорівнює тиску, що вказаний на вантажоприймальному пристрої $P_0 = 10 \text{ кгс/см}^2$.

Показання деформаційного манометра, які відповідають тиску $P_{\text{вп}} = P_0 = 10 \text{ кгс/см}^2$ занести в таблицю.

При установці поршня в межах робочого ходу та зніманні показань манометра необхідно здійснювати в ручну обертання поршня та вантажів. Частота обертання поршня залежить від ваги вантажів та поршня і повинна знаходитися в межах (30,...,120) об/хв. При малих вантажах частота обертання поршня повинна бути більше з метою збільшення довготривалості обертання.

Заповнення робочою рідиною внутрішнього об'єму вантажопоршневого манометра та манометра, який потрібно градуювати, забезпечується скальчатим насосом при возвратно-поступальному русі ручки насоса.

Створення необхідного тиску під поршнем здійснюється плавним обертанням штурвала гідравлічного преса. Обертання штурвала у напрямі обертання годинникової стрілки веде до збільшення тиску у середині приладу.

4. Розмістити один вантаж на вантажоприймальний пристрій. Вантажі, що використовуються в лабораторній роботі, мають номінал, який дорівнює 10 кгс/см^2 . Ця величина безпосередньо вказана на диску.

Вручну забезпечити обертання поршня. За допомогою насосів вантажопоршневого манометра встановити поршень, в межах робочого ходу. Тиск під поршнем при цьому буде дорівнювати

$$P_{\text{вп}} = P_{\text{н}} \cdot n + P_0 = 10 \text{ кГс/см}^2 \cdot 1 + 10 \text{ кГс/см}^2 = 20 \text{ кГс/см}^2,$$

де $P_{\text{вп}}$ – тиск, який створюється вантажопоршневим манометром;

$P_{\text{н}}$ – тиск номінальний, який вказано на вантажах; n - кількість вантажів, які розміщені на вантажоприймальному пристрої;

P_0 – тиск, який вказано на вантажоприймальному пристрої.

Показання деформаційного манометра, які відповідають тиску 20 кГс/см², занести в таблицю 2.1.

5. Поштучно збільшувати кількість вантажів на вантажоприймальному пристрої до $n=7$. Для кожного n фіксувати показання деформаційного манометра. При $n=7$ закінчити прямий хід процесу градуювання.

6. Після того, як тиск під поршнем буде дорівнювати $P_{\text{вп}}=80$ кГс/см², здійснити зворотній хід процесу градуювання – поштучно знімаються вантажі з вантажоприймального пристрою. Вручну забезпечити обертання поршня. Поршень за допомогою гідравлічного преса встановлюються в межах робочого ходу. Зафіксувати відповідні показання деформаційного манометра.

Прямий та зворотній ходи процесу градуювання складають один цикл вимірювань. Кількість циклів вимірювань повинна бути не менше трьох. Одержані при проведенні вимірювань значення $P_{\text{дф}}$ занести в таблицю 2.1 у відповідності з ходом та циклом вимірювань.

2.6. Статистична обробка результатів вимірювань

1. Для кожного значення $P_{\text{вп}i}$ таблиці 2.1 обчислити середнє значення $P_{\text{дф}i}$ за формулою:

$$P_{\text{дф}i} = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^{\delta} P_{\text{дф}i},$$

Одержані значення занести в таблицю 2.1.

2. В системі координат $P_{\text{вп}}$ - $P_{\text{дф}}$ ($P_{\text{вп}}$ – вісь абсцис, $P_{\text{дф}}$ – вісь ординат)

нанести точки, які відповідають парним значенням ($P_{вп_i} - P_{дф.ср_i}$). Одержані точки між собою не з'єднувати.

3. Обробити результати вимірювань методом найменших квадратів

Використати функціональну залежність вигляду:

$$P_{дф} = a_0 + a_1 \cdot P_{вп}, \quad (*)$$

де a_0 і a_1 – коефіцієнти, які потрібно визначити.

4. В прийнятій системі координат ($P_{вп} - P_{дф}$) провести пряму, яка відповідає одержаній функціональній залежності (*). Над прямою записати аналітичну залежність (*) з конкретними значеннями a_0 і a_1 .

5. Обчислити оцінку стандартного квадратичного відхилення коефіцієнта a_1 та інтервал, в якому з встановленою ймовірністю може знаходитися дійсне значення тангенса кута нахилу до осі абсцис шуканої прямої (коефіцієнт a_1).

2.7. Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

Звіт про виконання лабораторної роботи повинен включати наступні розділи:

1. Мета лабораторної роботи.
2. Основні відомості про вантажопоршневі манометри. Опис схеми МП-2500.
3. Короткі відомості про деформаційні трубчато-пружинні манометри.
4. Результати вимірювань, включаючи їх обробку методом найменших квадратів, та побудову графіка.

Рекомендована література: [1, 6, 10]

Лабораторна робота № 3

Вивчення та градуювання вимірювального перетворювача різниці тисків

Мета лабораторної роботи

Метою лабораторної роботи є:

- 1) вивчення конструктивних та схемних особливостей вимірювального перетворювача різниці тисків (ВПРТ);
- 2) вивчення принципової схеми дистанційної передачі з диференціально-трансформаторним перетворювачем;
- 3) знайомство з методикою та набуття практичних навичок одержання характеристик градуювання ВПРТ з використанням сучасних засобів завдання та вимірювання тиску.

3.1. Об'єкт вивчення

Об'єктом вивчення в даній лабораторній роботі є ВПРТ, що призначений для перетворення різниці тисків повітря у вихідний електричний сигнал.

В якості засобу вимірювання вихідного сигналу ВПРТ використовується аналоговий вимірювальний прилад КСД2.

Вимірювальний перетворювач – вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення [8].

Вимірювальний прилад – засіб вимірювання в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Аналоговий вимірювальний прилад – вимірювальний прилад, в якому візуальний сигнал вимірювальної інформації подається за допомогою шкали та показника.

Принципову схему ВПРТ наведено на рис. 3.1.

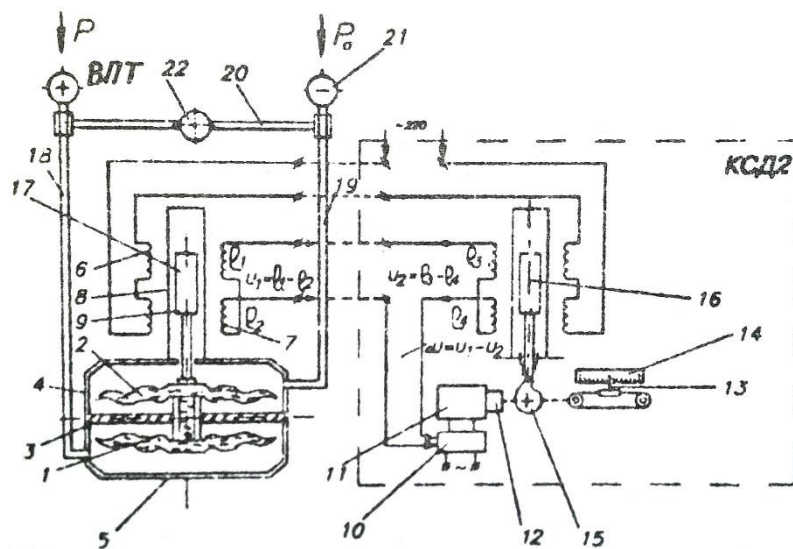


Рис. 3.1. Принципова схема вимірювального перетворювача різниці тисків

В роботі використовуються ВПРТ типу ДП(модель 3537), який має характеристики:

- верхня межа вимірювання різниці тисків $1,6 \cdot 10^4$ Па (1600 мм вод. ст.);
- допустимий робочий тиск $250 \cdot 10^5$ Па (250 ат);
- основна похибка $\pm 1,6\%$.

ВПРТ призначений для перетворення різниці двох тисків у зміну параметрів дистанційної диференціально-трансформаторної передачі. В загальному випадку використовується у складі засобів вимірювання різниці тисків та витрат рідин, газів, пару.

Основними конструктивними елементами ВПРТ є:

- 1) механічний пружний вимірювальний перетворювач;
- 2) диференціально-трансформаторний вимірювальний перетворювач;
- 3) корпус;
- 4) імпульсні трубки;
- 5) вентиля.

Механічний пружний вимірювальний перетворювач призначений для перетворення силової дії повітря в поступальне вертикальне переміщення жорсткого центру верхньої мембрани верхньої мембранної коробки. Механічний пружний вимірювальний перетворювач складається з нижньої мембранної коробки 1 та верхньої мембранної коробки 2. Обидві мембранні коробки жорстко з'єднанні на перегородці 3. Кожна мембранна коробка одержана зварюванням по зовнішньому контуру двох гофрированих мембран, профілі яких співпадають. Внутрішні порожнини мембранних коробок сполучаються через канал, який виконаний в опорах мембранних коробок. Внутрішні порожнини мембранних коробок та з'єднуючий канал заповнені дистильованою водою.

Мембранні коробки розташовані у порожнинах, які утворені перегородкою 3, верхньою 4 та нижньою 5 кришками.

Більший (додатній) тиск підводиться до нижньої порожнини, менший (від'ємний) тиск – до верхньої порожнини.

При зміні підведених тисків мембранні коробки деформуються і рідина при цьому перетікає з однієї мембранної коробки в іншу. Збільшення різниці тисків приводить до стиску нижньої мембранної коробки та перетіканню рідини з нижньої мембранної коробки у верхню. Зменшення різниці тисків приводить до стиску верхньої мембранної коробки та перетіканню рідини з верхньої мембранної коробки у нижню. Деформація верхньої мембранної коробки приводить до поступального вертикального переміщення жорсткого центру верхньої мембранної коробки.

Використана конструкція механічного пружного вимірювального перетворювача в ВПРТ дозволяє:

- 1) запобігти руйнуванню або зім'ягненню мембранних коробок у тих випадках, коли фактична різниця тисків суттєво перевищує граничні припустимі різниці тисків. В цих випадках одна з мембранних коробок складеться за профілем, вся рідина перейде у другу мембранну коробку і руйнування не відбудеться;
- 2) зменшити вплив зміни температури середовища, що заповнює порожнини, в

яких розташовані мембранні коробки. Зміна температури середовища приводить до теплової зміни об'єму рідини, що заповнює мембранні коробки. Основним методом зниження впливу фактора теплового розширення рідини є забезпечення умов, при яких деформація верхньої мембранної коробки буде мінімальною. В конструкції це досягається тим, що нижня мембранна коробка 1 встановлена у додатній камері, має жорсткість у декілька раз меншу, ніж жорсткість верхньої мембранної коробки 2. В цьому випадку тепла зміна об'єму рідини, що заповнює мембранні коробки, викликає деформацію в основному нижньої мембранної коробки. Деформація верхньої мембранної коробки та відповідне переміщення жорсткого центру верхньої мембрани буде значно менше. Таким чином знижується вплив зміни температури рідини, яка заповнює мембранні коробки, на зміну вихідного сигналу ВПТ.

Диференціально-трансформаторний вимірювальний перетворювач (ДТВП) має індуктивну котушку, яка складається з первинної 6 та вторинної 7 обмоток, що містять по дві секції. Секції первинної обмотки включені згідно. Секції вторинної обмотки включені зустрічно.

Індуктивна котушка надіта на розподільувальну трубку 8, яку виготовлено із немагнітної нержавіючої сталі. В середині трубки знаходиться плунжер 9, виготовлений із феромагнітного матеріалу. При підключенні первинної обмотки до мережі змінного струму у секціях вторинної обмотки індукується е.р.с. Секції вторинної обмотки з'єднані таким чином, щоб їх е.р.с. знаходилися у протифазі, а результативна напруга, яка знята із вторинної обмотки, дорівнювала різниці цих е.р.с. При симетричному розташуванні плунжера відносно секції вторинної обмотки напруга на її клеммах дорівнює нулю. Переміщення плунжера приводить до збільшення е.р.с. секції, в яку входить плунжер, і до зменшення е.р.с. секції, з якої виходить плунжер. На затискачах вторинної обмотки з'являється напруга, яка пропорційна переміщенню плунжера.

Диференціально-трансформаторний вимірювальний перетворювач ВПРТ з'єднано з ідентичним (компенсуючим) диференціально-трансформаторним

перетворювачем приладу КСД2 таким чином, щоб первинні обмотки з'єднувалися послідовно, а напруги, що знімаються з вторинних обмоток, знаходилися в протифазі.

Результативна напруга, яка подана на вхід підсилювача 10, дорівнює різниці напруг, що зняті з вторинних обмоток передаючого та компенсуючого перетворювачів. Якщо плунжери обох диференціально-трансформаторних перетворювачів знаходяться в однакових положеннях відносно секцій вторинних обмоток, то напруга, яка подається на вхід підсилювача, дорівнює нулю. При зміні різниці тисків змінюється положення плунжера диференціально-трансформаторного перетворювача ВПРТ і напруги, що індукуються у вторинних обмотках котушок ВПРТ і приладу КСД2, не будуть рівні між собою, на вхід підсилювача подається напруга, величина і фаза якої залежить від величини та напрямку переміщення плунжера ВПРТ.

Змінна напруга ΔU , яка підсилюється напівпровідниковим підсилювачем 10, приводить до обертання реверсивного двигуна 11, який через редуктор 12 переміщує показник 13 відносно шкали 14 і, одночасно, за допомогою кулачка 15 – плунжер 16 компенсаційного диференціально-трансформаторного перетворювача. Напрямок обертання двигуна залежить від фази напруги, яка подана на вхід підсилювача. Переміщення плунжера продовжується доти, поки напруга на виході підсилювача не стане менше порога чутливості системи управління двигуна. Таким чином, кожному положенню плунжера ВПРТ, що визначає значення вимірювальної різниці тисків, відповідає визначене положення плунжера диференціально-трансформаторного перетворювача приладу КСД2 та положення показника відносно шкали.

Вимірювальний ланцюг ВПРТ -КСД2 уявляє собою вимірювальний ланцюг астатичного зрівноважуючого типу. Астатичне зрівноваження досягається тим, що реверсивний двигун виконує функції інтегруючої ланки. Схеми астатичного зрівноваження називають слідкуючими вимірювальними системами. Відстань між ВПРТ та КСД2 при застосуванні манометра у

виробничих умовах може досягати при відсутності додаткової похибки 250 м. При умові припустимості додаткової похибки в 1% розмір лінії зв'язку може досягати 1500 м.

Корпус ВПРТ складається з масивної перегородки 3, двох роз'єднувальних кришок - верхньої 4 та нижньої 5. На верхній – встановлені імпульсні трубки, елементи диференціально-трансформаторного перетворювача та захисний ковпак 17. Перегородка та кришки з'єднані шістьма болтами.

Імпульсні трубки призначені для: 18 – підводу додатного (більшого) тиску у нижню камеру; 19 – підводу від'ємного (меншого) тиску у верхню камеру; 20 – сполучення внутрішніх об'ємів додатної та від'ємної камер.

Вентилі призначені для:

- додатний вентиль 23 – підключення або роз'єднання внутрішніх об'ємів додатної камери та імпульсної трубки, що підводить більший тиск;
- від'ємний вентиль 21 – підключення або роз'єднання внутрішніх об'ємів від'ємної камери та імпульсної трубки, що підводить менший тиск;
- вентиль 22 – з'єднання та роз'єднання внутрішніх об'ємів додатної (нижньої) і від'ємної (верхньої) камер.

Виробники: ВПРТ- Приладобудівний завод, м. Івано-Франківськ, КСД2-ВО "Львівприлад", м. Львів.

3.2. Робоче завдання

Визначити експериментально характеристику градування засобу вимірювання, що складається з ВПРТ та КСД2.

3.3. Програма підготовки до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити матеріали про диференційні деформаційні засоби вимірювання тиску та їх елементи за конспектом лекцій та рекомендованою літературою .

Для запису результатів вимірювань підготувати таблицю виду 3.1.

Результати вимірювань

п							
Рн, мм рт. ст.	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл		Сер. знач.
	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	
0							
10							
20							
.							
.							
.							
80							

3.4. Опис лабораторної установки

Принципову схему лабораторної установки наведено на рис. 3.2.

До складу лабораторної установки входять: 1 – компресор; 2 – ресивер; 3 – вимірювач повітряних тисків; 4 – ВПРТ; 5 – КСД2; 6,7,8 – гумові пневмошланги; 9 – з'єднувальний електричний кабель.

Компресор – являє собою діафрагменний електромеханічний пристрій, який є джерелом пневможивлення лабораторної установки. В окремих випадках замість насосів БНМ можна використати інші джерела пневможивлення, наприклад, компресори. Тиск, який створюється, повинен контролюватися і не перевищувати $(2,...,3)10^5$ Па, $(2,...,3)$ ат.

Ресивер – уявляє собою порожній циліндр, який призначений для акумулювання стиснутого повітря.

Вимірювач повітряних тисків (ИВД) – уявляє собою електромеханічний прилад, який призначений для перевірки в лабораторних умовах різноманітних засобів вимірювання тиску. ИВД забезпечує створення, вимір і ввід у виріб, що

перевіряється абсолютного тиску від 815 до 8 мм рт. ст. та надмірного тиску від 0 до 1400 мм рт. ст.

ВПРТ та КСД2 – з'єднані між собою засоби вимірювальної техніки утворюють дифманометр, який призначений для вимірювання надмірного тиску, який треба проградуювати при виконанні цієї лабораторної роботи. Включення компресора здійснюється тумблером, який розташований на його передній панелі.

При проведенні лабораторної роботи необхідно обережно працювати з ВПТ (ИВД), так як він є точним приладом, який легко пошкодити.

Тиск, який поступає з ресивера через штуцер "Давление" регулюється вентилем "Давление", вимірюється за вказниками ВПТ(ИВД) та подається в засіб вимірювання, який градуується, через штуцер "Р_д". Тиск в ВПТ(ИВД) необхідно подавати повільно, плавно обертаючи ручки вентилів, так як показники повинні встигати обробляти задані тиски.

Відлік показань показників проводиться за цифровими показниками та положеннями стрілок відносно циферблатів. Одиницями вимірювання тиску є міліметри ртутного стовпчика (мм рт.ст).

Передача тиску від компресора до ресиверу, потім до ВПТ(ИВД) і ВПРТ

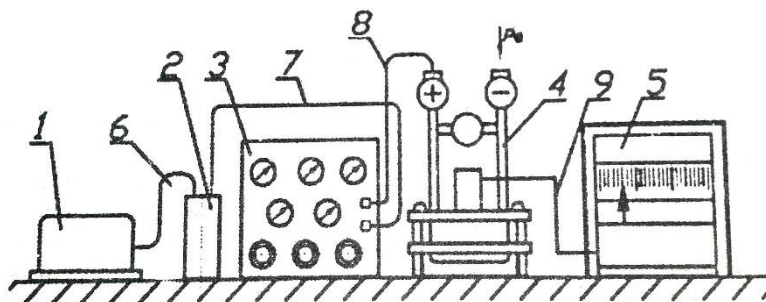


Рис. 3.2 Принципова схема лабораторної установки

здійснюється за допомогою гумових пневмошлангів 6-8. Електричний зв'язок між ВПРТ і КСД2 здійснюється за допомогою кабелю 9. Електричне живлення приладів лабораторної установки здійснюється: сталим струмом напругою 27 В (блок насосів, ВПРТ(ИВД)); змінним струмом напругою 115 В частотою 400 Гц

ВПТ(ИВД); змінним струмом напругою 220 В частотою 50 Гц (КСД2).

3.5. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи

Методика виконання лабораторної роботи орієнтована на одержання характеристики градуювання дифманометра (вимірювальної установки ВПРТ – КСД2) при застосуванні його як засобу вимірювання надлишкового тиску.

Надлишковий тиск можна визначити як різницю двох тисків:

$$\Delta P = P - P_a,$$

де ΔP – надлишковий тиск;

P – абсолютний тиск, який підводиться до додатньої камери ВПРТ від ВПТ (ИВД);

P_a – абсолютний тиск оточуючого повітряного середовища – атмосферний тиск, що підводиться до від'ємної камери ВПТ.

$$P > P_a.$$

Характеристика градуювання манометра визначається у вигляді:

$$n = f(\Delta P),$$

де n – показання КСД2.

Пристрої, які входять до складу лабораторної установки, повністю з'єднані між собою.

Включення блока компресора, ВПТ(ИВД) і КСД2 здійснюється викладачем.

Градування манометра здійснюється за наступною послідовністю:

1. Повільним, плавним обертанням ручок у напрямі руху годинникової стрілки закрити усі вентилі, ручки яких виведені на передню панель ВПТ(ИВД).

Відкрити вентилі В1 (додатній) та В2 (від'ємний), закрити вентиль В3, які встановлені на трубках ВПРТ.

При виконанні лабораторної роботи для змінювання тиску у додатній камері ВПРТ використовуються вентиль "Давление", розташований на передній панелі ВПТ(ИВД). Вентиль має дві ручки - більшого діаметра та меншого діаметра. При невеликому плавному повороті більшої ручки у напрямі протилежному руху годинникової стрілки, тиск у додатній камері ВПРТ збільшується. Збільшення тиску припиняється, якщо більшу ручку вентиля повернути в напрямі руху годинникової стрілки до упору. Зменшення тиску в додатній камері ВПРТ досягається при плавному повороті на невеликий кут у напрямі проти руху годинникової стрілки малої ручки вентиля "Давление".

Величина надмірного тиску, що подається в ВПРТ, вимірюється за показником "0 – 200мм рт.ст." ВПТ(ИВД). Одиниці виміру тиску – мм рт.ст. (1мм рт.ст. = 133,322Па).

2. За участю викладача включити компресор, ВПТ(ИВД), КСД2 – ВПРТ. Забезпечити створення в системі пневможивлення лабораторної установки тиск $2 \cdot 10^5$ Па ($2 \text{ кгс/см}^2 = 2 \text{ ат.}$). Довготривалість роботи компресора погодити з викладачем.

3. Плавним поворотом малої ручки вентиля "Давление" у напрямі проти руху годинникової стрілки забезпечити скид в атмосферу надмірного тиску із зв'язаних між собою внутрішніх об'ємів додатньої камери ВПРТ, з'єднувального пневмошланга, внутрішнього об'єму показника "0 - 200мм рт.ст." Велика ручка вентиля "Давление" при цьому залишається закритою.

В результаті повного скиду надмірного тиску із пневмомагістралі лічильник та стрілки показника "0 – 200 мм рт.ст." повинні встановлюватися на нуль, а показник КСД повинен зайняти положення близько до нуля. Після цього малу ручку вентиля "Давление" плавно повернути у напрямі руху годинникової стрілки до упору.

Лабораторна установка готова до проведення лабораторної роботи.

4. Періодично, плавно повертаючи велику ручку вентиля «Давление», забезпечити послідовну установку тиску в межах від 0 до 80 мм рт. ст. з кроком

10 мм рт. ст. (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80).

Для кожного фіксованого значення тиску необхідно проводити запис в таблицю показань КСД2. Після запису показань, що відповідають різниці тисків 80 мм рт. ст. необхідно провести плавне ступінчасте зменшення різниці тисків. Для цього слід використовувати малу ручку вентиля «Давление». Велика ручка при цьому повинна бути повернута до упору праворуч (в напрямку обертання стрілки годинника). Зменшення до нуля різниці тисків в пневмосистемі слід проводити покроково фіксовано з записом показань КСД2. Значення одного покрокового зменшення різниці тисків повинно складати 10 мм рт. ст..

Далі слід повторити цикл збільшення-зменшення різниці тисків ще два рази. Загальна кількість циклів збільшення-зменшення різниці тисків повинна дорівнювати трьом.

5. Чисельні значення отримані за допомогою КСД2 записати в таблицю виду 3.1.

3.6. Статистична обробка результатів вимірювань

1. В системі координат $P_n - n$ (P_n – вісь абсцис, n – вісь ординат) нанести точки, які відповідають парам значень ($P_{нсрі} - n_i$).

Одержані точки між собою не з'єднувати.

2. Обробити результати вимірювань методом найменших квадратів. За вихідну функціональну залежність слід взяти залежність виду:

$$n = a_0 + a_1 \cdot \Delta P \quad (*)$$

3. У прийнятій системі координат ($\Delta P - n$) провести пряму лінію, яка відповідає визначеній функціональній залежності (*). Над прямою лінією записати аналітичну залежність (*) з обчисленими конкретними значеннями a_0 і a_1 .

4. Обчислити оцінку стандартного квадратичного відхилення коефіцієнта a_1 та інтервал, в якому з встановленою ймовірністю може знаходитися дійсне

значення тангенса кута нахилу шуканої прямої (коефіцієнт a_1).

3.7. Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

Звіт про виконання лабораторної роботи повинен включати наступні розділи:

1. Мета лабораторної роботи.
2. Короткі теоретичні відомості про манометр ВПРТ-КСД2 та його схему.
3. Схема лабораторної установки та її опис.
4. Результати вимірювань, включаючи їх обробку методом найменших квадратів, та побудову графіка ($\Delta P - n$).

Рекомендована література: [1, 8, 14]

Лабораторна робота № 4

Градуювання витратоміра із звужуючим пристроєм

Мета лабораторної роботи

Метою лабораторної роботи є:

- 1) вивчити принцип дії, принципові схеми, конструкції витратомірів зі звужуючими пристроями;
- 2) набути практичні навички по одержуванню характеристик градуювання витратоміра зі звужуючим пристроєм;
- 3) набути практичні навички по обробці та представленні одержаних результатів лабораторних вимірювань.

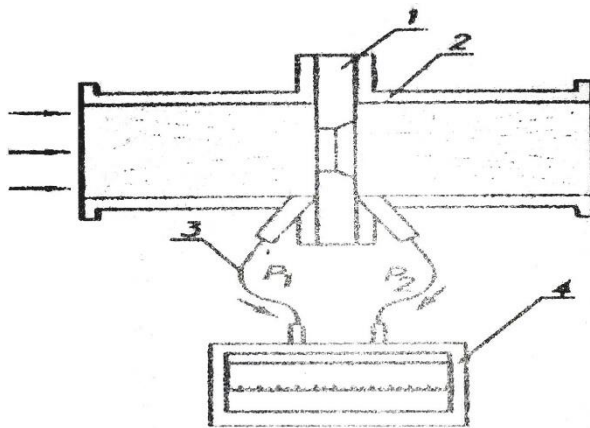


Рис 4.1. Принципова схема витратоміра зі звужуючим пристроєм

4.1. Об'єкт вивчення

Об'єктом вивчення в даній лабораторній роботі є витратомір зі звужуючим пристроєм. Принципова схема витратоміра наведено на рис. 4.1.

До складу витратоміра зі звужуючим пристроєм входять: звужуючий пристрій 1, корпус 2, імпульсні трубки 3, вимірювальний прилад 4.

Звужуючий пристрій уявляє собою діафрагму – тонкий плоский диск з центральним наскрізним отвором круглої форми. Діафрагма призначена для звужування потоку повітря, який проходить по трубопроводу. Діафрагма, яка

використовується в лабораторній установці, має діаметр отвору 12,5 мм, відносну площу $m=0,65$, зовнішній діаметр 50,0 мм і товщину 3,0 мм. Центральний отвір має вихідний скіс.

Корпус призначений для закріплення звужуючого пристрою та елементів відбору статичного тиску. Конструкція корпусу

забезпечує точковий кутовий метод відбору тиску з трубопроводу.

Імпульсні трубки призначені для підводу статичних тисків P_1 та P_2 від трубопроводу до вимірювального приладу.

Вимірювальний прилад призначений для вироблення візуального сигналу вимірювальної інформації про величину, яка вимірюється. В даній лабораторній роботі як вимірювальний прилад використовується деформаційний диференціальний манометр типу ТНМП-100 кл. 2,5. Межі вимірювання ± 125 кГс/м² (± 1250 Па). Ціна поділки 5 кГс/м² (50 Па).

4.2. Робоче завдання

Визначити експериментальним шляхом характеристику градуювання витратоміра зі звужуючим пристроєм.

4.3. Програма підготовки до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити матеріали про витратоміри зі звужуючими пристроями по конспекту лекцій і рекомендованій літературі.
2. Для запису вихідних результатів вимірювань підготувати таблицю виду 4.1.

4.4. Опис лабораторної установки

Принципову схему лабораторної установки наведено на рис. 4.2.

До складу лабораторної установки входять: 1 – збуджувач витрат; 2 – трубопровід; 3 – вузол звужуючого пристрою, 4 – лічильник кількості повітря, яка проходить через трубопровід; 5 – індикаторні трубки; 6 – диференціальний манометр, 7 – лабораторний автотрансформатор; 8 – секундомір.

Вузол звужуючого пристрою 3, індикаторні трубки 5 та диференціальний

манометр 6 у сукупності уявляють собою витратомір зі звужуючим пристроєм.

Збуджувач витрат призначений для створення потоку повітря в трубопроводі. Він уявляє собою вузол вентилятора з електроприводом. Величина витрат повітря в трубопроводі пропорційна частоті обертання ротора вентилятора. Зміна частоти обертання ротора вентилятора приводить до зміни витрат повітря в трубопроводі.

Таблиця 4.1

Результати вимірювань

ΔP кгс/м ²	$\Delta V = V_k - V_n, \text{ м}^3$					
	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл	
	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід
0						
10						
20						
.						
.						
.						
100						

де V_k – кінцеве показання лічильника,

V_n – початкове показання лічильника.

Лабораторний автотрансформатор ЛАТР призначений для регулювання напруги, яка подається на електродвигун збуджувача витрат. Зміна напруги, яка подається на електродвигун, приводить до зміни частоти обертання ротора вентилятора, а це відповідно до зміни витрат повітря в трубопроводі.

В роботі використовується лабораторний автотрансформатор типу РНО250-2. Напруга живлення складає 220В при частоті 50Гц.

Лічильник кількості повітря призначений для виміру об'єму повітря, який проходить по трубопроводу за фіксовані проміжки часу. В лабораторній роботі застосовується лічильник кількості типу РГ40-1-2,5. Ціна мінімального розряду лічильника складає 0,01 м³.

Секундомір призначений для часової фіксації інтервалів вимірювання. При виконанні лабораторної роботи можна використати електронний чи механічний секундомір або наручний годинник з секундною стрілкою.

4.5. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи

Включення лабораторного автотрансформатора в електричну мережу здійснює викладач. Після перевірки викладачем працездатності всього лабораторного обладнання студенти приступають до градуювання витратоміра зі звужуючим пристроєм за наступною послідовністю.

1) Встановити повзун лабораторного автотрансформатора у нульове положення. Ротор електродвигуна збуджувача витрат при цьому не повинен обертатися. Візуально фіксується та заноситься у таблицю вихідне положення показчика диференціального манометра відносно шкали.

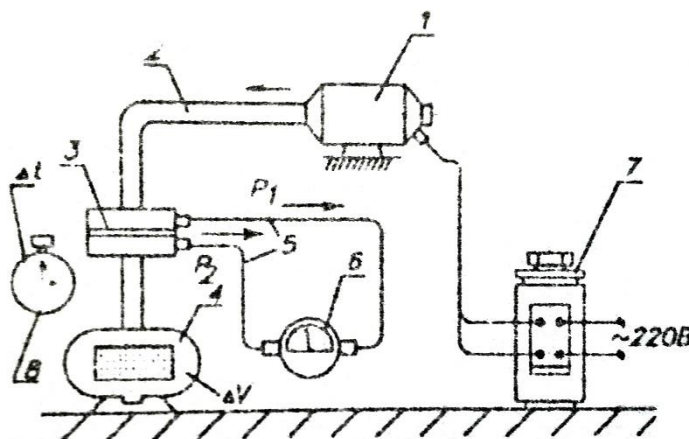


Рис 4.2. Принципова схема лабораторної установки

2) Повільним та плавним обертанням ручки лабораторного автотрансформатора в напрямі обертання годинникової стрілки збільшити напругу, яка подається на електродвигун збуджувача витрат до рівня, при якому показчик диференційного манометра займе положення відносно шкали, що відповідає різниці тисків у 10 кгс/м^2 (100 Па) – дві поділки по шкалі приладу. Візуально зафіксувати і записати початкове показання лічильника $V_{\text{п}}$, яке відповідає початку прийнятого фіксованого часового інтервалу. Довготривалість фіксованого часового інтервалу Δt рекомендується прийняти рівній 20 секундам.

Після закінчення часового інтервалу візуально зафіксувати кінцеве показання лічильника V_k .

Визначити:

$$\Delta V = V_k - V_n, (m^3).$$

Одержане значення записати в таблицю у стовпчик та рядок, що відповідають 1-му циклу, прямому ходу, $\Delta P = 10 \text{ кГс/м}^2$.

3. Послідовно, ступінчасто збільшуючи напругу, яка подається на електродвигун вентилятора, визначити значення ΔV_i при ΔP , рівних 20, 30..., 100 кГс/м² (прямий хід).

4. Послідовно, ступінчасто зменшуючи напругу, яка подається на електродвигун вентилятора, визначити значення ΔV_i при ΔP , рівних 90, 80, ..., 0 кГс/м² (зворотний хід).

5. Прямий та зворотній хід складають один цикл вимірювань. Загальна кількість циклів вимірювань при виконанні лабораторної роботи повинна бути не менше трьох.

4.6. Обробка результатів вимірювань

1. При діленні кожного значення ΔV_i на Δt одержимо чисельні значення об'ємних витрат Q повітря, які відповідають конкретним фіксованим значенням різниці тисків ΔP_i . Одержані значення Q_i , рекомендується занести в таблицю виду 4.2.

2. В системі координат $\Delta P - Q$ (ΔP – вісь абсцис, Q – вісь ординат) нанести точки, які відповідають значенням $(\Delta P_i - Q_{ср i})$. Одержані точки між собою не з'єднувати.

3. Обробити результати вимірювань методом найменших квадратів. За вихідну функціональну залежність взяти залежність виду

$$Q = \alpha \cdot (\Delta P)^\beta, \quad (*)$$

де α та β – коефіцієнти, які визначаються за методом найменших квадратів.

4. В прийнятій системі координат ($\Delta P - Q$) побудувати характеристику

градування, яка відповідає аналітичній залежності (*) з обчисленими конкретними значеннями коефіцієнтів α та β .

Таблиця 4.2.

Значення об'ємних витрат повітря

ΔP кгс/м ²	Об'ємні витрати Q , м ³ /с					
	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл	
	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід
0						
10						
20						
.						
.						
.						
100						

4.7. Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

Звіт про виконання лабораторної роботи повинен включати наступні розділи:

1. Мета лабораторної роботи.
2. Короткі теоретичні відомості про об'єкт вивчення, опис принципу його дії.
3. Схема лабораторної установки та її опис.
4. Результати вимірювань, включаючи їх обробку методом найменших квадратів і побудову характеристики градування.

Рекомендована література: [12, 13]

Лабораторна робота №5

Градуювання ротаметра з місцевою шкалою

Мета лабораторної роботи

Метою лабораторної роботи є:

- 1) вивчити принцип дії та конструкції ротаметрів;
- 2) набути практичні навички одержання характеристик градуювання ротаметрів;
- 3) набути практичні навички обробки та представлення отриманих результатів лабораторних вимірювань.

5.1 Об'єкт вивчення

Об'єктом вивчення є ротаметр з місцевою шкалою типу РМ-0,04 ЖУЗЗ.

Принципова схема ротаметра наведена на рис. 5.1.

Основними елементами ротаметра є скляна конічна вертикально встановлена трубка 1 та поплавки 2. Потік вимірювального середовища повинен рухатися тільки знизу угору. При зростанні витрат поплавки переміщуються угору. При зниженні витрат поплавки переміщуються униз. Вертикальне положення поплавка визначається величиною об'ємних витрат, які мають місце в даний момент. Для визначення відносного вертикального положення поплавка на зовнішній боковій поверхні трубки нанесена шкала з поділками 0,10,20,..., 100.

Вертикальне переміщення поплавка приводить до зміни площі кільцевої щілини між ним і внутрішньою поверхнею трубки. При цьому, змінюються параметри факторів силової взаємодії між поплавком і потоком вимірювального середовища. При сталих витратах поплавки знаходяться в умовах силової рівноваги і не переміщуються. Таким чином, кожному сталому значенню об'ємних витрат конкретного вимірювального середовища відповідає єдине положення поплавка в конічній трубці. Ця обставина використовується для вимірювання об'ємних витрат.

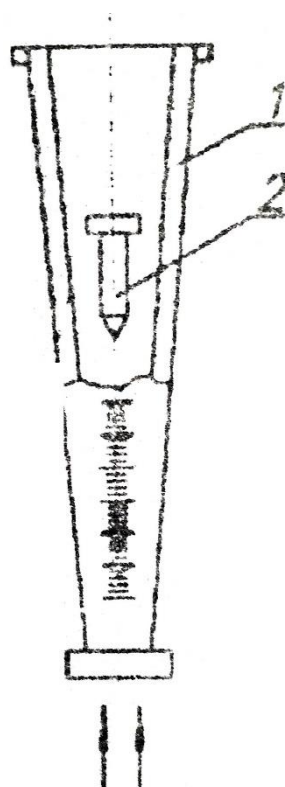


Рис 5.1. Принципова схема ротаметра з місцевою шкалою

Поплавок в ротаметрах з місцевою шкалою виконує функцію вимірювального перетворювача витрат і одночасно є показчиком, який переміщується відносно шкали.

Параметри характеристик градуювання ротаметрів, які мають однакові конічні трубки, залежать від форми, розмірів і маси поплавка.

5.2. Робоче завдання

Визначити експериментально характеристики градуювання двох ротаметрів з місцевою шкалою, які мають однакові скляні конічні трубки і поплавки однієї форми та розмірів, але різних мас.

5.3. Програма підготовки до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити матеріали про ротаметри по конспекту лекцій і рекомендованій літературі.
2. Для запису вихідних результатів вимірювань підготувати дві таблиці виду 5.1.

Таблиця 5.1.

Результати вихідних вимірювань
 Ротаметр № _____ Матеріал поплавка _____

n	Об'єм V, дм ³					
	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл	
	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід
0						
10						
20						
.						
.						
.						
100						

5.4. Опис лабораторної установки

Принципова схема лабораторної установки наведена на рис. 5.2.

До складу лабораторної установки входять: ротаметри 1, 2, 3, блок управління 4, газолічильник 5, з'єднувальні гумові шланги 6 і 7, секундомір 8.

В лабораторній роботі використовуються ротаметри скляні з місцевою шкалою типу РМ-0,04 ЖУЗ, кл. 2,5.

Блок управління призначений для розміщення та фіксації ротаметрів, збуджувача витрат, лабораторного автотрансформатора і елементів управління.

Збуджувач витрат призначений для створення потоку повітря в пневмосистемі. Він уявляє собою вентилятор з електроприводом. Потік повітря в пневмосистемі безпосередньо створюється при обертанні ротора вентилятора електродвигуном. Величина витрат повітря в пневмосистемі пропорційна частоті обертання ротора вентилятора. Зміна частоти обертання ротора електродвигуна приводить до зміни частоти обертання ротора вентилятора і, отже, до зміни витрат повітря в пневмосистемі.

При роботі збуджувача витрат потік повітря проходить за ланцюгом: збуджувач витрат – шланг 6 – газовий лічильник – шланг 7 – елементи управління – ротаметри – викид в атмосферу.

Лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) призначений для регулювання напруги, яка подається на електродвигун збуджувача витрат. Зміна напруги, яка подається на електродвигун, приводить до зміни частоти обертання ротора вентилятора, а це веде до зміни витрат повітря в пневмосистемі.

У роботі використовується лабораторний трансформатор типу РНО250-2. Напруга живлення складає 220 В при частоті 50 Гц.

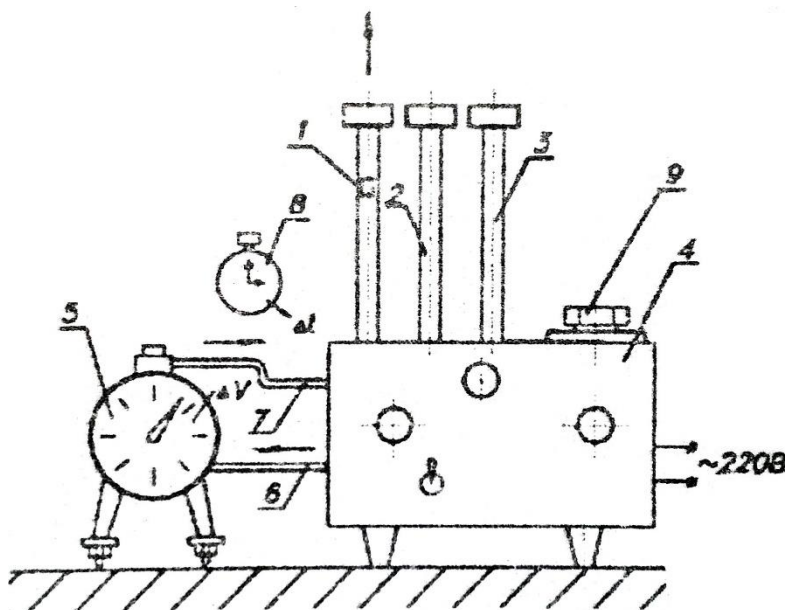


Рис 5.2. Принципова схема лабораторної установки

Ручка управління автотрансформатора 9 виведена на верхню панель блока управління.

Елементи, які призначені для управління роботою обладнання лабораторної установки виведені на передню панель блоку управління. Ручки призначені для управління відповідними ротаметрами, тумблер – для підключення до зовнішньої електричної мережі лабораторного автотрансформатора.

Газолічильник барабанний призначений для вимірювання об'єму повітря, який пройшов за фіксований проміжок часу по пневмосистемі.

В лабораторній роботі використовується газолічильник барабанний з

рідинним затвором типу ГСБ-400 кл.1. Ціна поділки кругової шкали складає 0,02 дм³. Один оберт стрілки відповідає 5 дм³.

Секундомір призначений для часової фіксації інтервалів вимірювання. При виконанні лабораторної роботи можна використати електронний або механічний секундомір, наручний годинник з секундною стрілкою.

5.5. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи

Включення в електричну мережу лабораторного автотрансформатора здійснює викладач. Після перевірки викладачем працездатності всього лабораторного обладнання студентів приступають до градуювання ротаметрів. Рекомендується наступна послідовність виконання роботи:

1. Встановити перемикач "Рот.1" у положення "вкл.", яке відповідає підключенню до пневмомережі першого (лівого) ротаметра.

2. Плавним обертання ручки лабораторного автотрансформатора в напрямі обертання годинникової стрілки збільшити напругу, яка подається на електродвигун збуджувача витрат. Збільшення напруги приводить до обертання ротора вентилятора і появи в пневмомережі лабораторної установки потоку повітря. По мірі збільшення потоку повітря поплавки першого ротаметра почне переміщуватися вертикально угору. Плавним обертанням ручки лабораторного автотрансформатора забезпечити сполучення верхньої площини поплавка з поділкою 10 шкали на скляній трубці ротаметра.

3. В момент проходження стрілкою газолічильника нульової поділки шкали включити секундомір і почати відлік часового інтервалу. Довготривалість часового інтервалу повинна складати (20,...,30) секунд. По завершенню часового інтервалу візуально фіксується положення стрілки газолічильника відносно шкали і тим самим визначається об'єм повітря, який пройшов через газолічильник і ротаметр. Одержане значення об'єму повітря заносимо в таблицю 5.1.

4. Послідовно, ступінчасто збільшуючи за допомогою лабораторного автотрансформатора напругу, що подається на електродвигун збуджувача витрат, визначити об'єми повітря, які проходять за фіксовані інтервали часу через перший ротаметр при положеннях поплавка на поділках шкали 20, 30,..., 100. Одержані значення внести в таблицю 5.1 у стовпець "1-й цикл", "прямий хід".

5. Послідовно, ступінчасто зменшуючи за допомогою лабораторного автотрансформатора напругу, що подається на електродвигун збуджувача витрат, визначити об'єми повітря, які проходять за фіксовані інтервали часу через ротаметр при положеннях поплавка, що відповідають поділкам шкали 90, 80,..., 10. Одержані значення внести в таблицю 5.1 у стовпець "1-й цикл", "зворотній хід".

Вимірювальне переміщення поплавка вгору (прямий хід) і вниз (зворотній хід) складає один цикл вимірювань.

Загальна кількість циклів, вимірювань для одного ротаметра (або одного типу поплавка) при виконанні лабораторної роботи повинна бути не менше трьох.

6. Вимірювання за вказаною вище послідовністю повинні бути проведені для другого ротаметра.

Припускається проведення лабораторної роботи при застосуванні однієї скляної конічної трубки та двох поплавків різної маси. У цьому випадку вимірювання проводяться при введенні в трубку одного з поплавків. Послідовність виконання роботи повинна відповідати наведеному вище.

5.6. Статистична обробка результатів вимірювань

Обробку результатів вимірювань доцільно проводити у наступній послідовності:

1. Підготувати таблицю 5.2.

Значення витрат

Ротаметр № _____

Матеріал поплавка _____

n	Об'ємні витрати Q, м³/с					
	1-й цикл		2-й цикл		3-й цикл	
	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід	Пр. хід	Звор. хід
0						
10						
20						
.						
.						
.						
100						

2. За наведеною нижче формулою для кожного значення об'єму повітря визначити об'ємні витрати:

$$Q_i = \frac{V_i}{\Delta t_i},$$

де Q_i – об'ємні витрати повітря;

V_i – вимірювальне значення об'єму повітря;

Δt_i – принята довготривалість фіксованих часових інтервалів.

Одержані значення внести в таблицю 5.2.

Середнє значення витрат повітря $Q_{\text{сер}}$, визначити при прямому та зворотньому ходах за три цикли.

3. В системі координат $n - Q$ (n – вісь абсцис, Q – вісь ординат) нанести точки, які відповідають значенням ($n_i - Q_{\text{сер}i}$). Одержані точки між собою не з'єднувати.

4. Обробити результати вимірювань методом найменших квадратів.

За вихідну функціональну залежність взяти залежність

$$Q = a_0 + a_1 n, \quad (*)$$

де a_0, a_1 – коефіцієнти, які визначаються за методом найменших квадратів.

5. У прийнятій системі координат (n-Q) побудувати характеристики градування ротаметрів, які відповідають конкретним аналітичним залежностям виду (*). Біля побудованих характеристик градування записати аналітичні залежності виду (*) з обчисленими конкретними значеннями коефіцієнтів a_0 , a_1 .

6. Обчислити оцінку стандартного відхилення коефіцієнта a_1 і визначити інтервал, в якому з установленою ймовірністю може знаходитися дійсне значення тангенсу кута нахилу шуканої прямої (коефіцієнт a_1).

5.7. Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

Звіт про виконання лабораторної роботи повинен включати наступні розділи:

1. Мета лабораторної роботи.
2. Короткі теоретичні відомості про об'єкт вивчення, опис принципу його дії.
3. Опис та схема лабораторної установки.
4. Результати вимірювань, включаючи їх обробку методом найменших квадратів і побудову характеристики градування.

Рекомендована література: [2, 12, 13]

Лабораторна робота № 6

Визначення витрат повітря за допомогою напірної трубки Піто

Мета лабораторної роботи

Метою лабораторної роботи є:

- 1) вивчити принцип та метод виміру витрат за допомогою напірних трубок;
- 2) вивчити конструкції напірних трубок;
- 3) набути практичні навички по визначенню епюри швидкості в потоці газу за допомогою напірної трубки;
- 4) набути практичні навички по виміру витрат газу в трубопроводі за допомогою напірної трубки.

6.1. Об'єкт вивчення

Об'єктом вивчення в лабораторній роботі є напірна трубка Піто. Напірною трубкою Піто називається напірна трубка Г- образної форми, відкритий кінець якої має обтічну форму і виставляється назустріч потоку для сприйняття повного тиску [7].

6.2. Робоче завдання

Визначити експериментально:

- 1) поздовжні складові швидкості потоку повітря в трубопроводі прямокутного поперечного перерізу;
- 2) об'ємні витрати повітря в трубопроводі прямокутного поперечного перерізу.

6.3. Програма підготовки до виконання лабораторної роботи

1. Вивчити матеріали про напірні трубки по конспекту лекцій і рекомендованій літературі.
2. Для запису результатів вимірювань підготувати таблицю виду 6.1.

Результати вимірювань

Довжина стовпчика зрівноважуючої рідини L_i при $k=0,2$

Горизонт. переріз, №	Цикл вимір.	Точки горизонтальних перерізів, N									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1										
	2										
	3										
2	1										
	2										
	3										
3	1										
	2										
	3										
4	1										
	2										
	3										

6.4. Опис лабораторної установки

Принципову схему лабораторної установки наведено на рис. 6.1.

До складу лабораторної установки входять: напірна трубка 1, трубопровід 2, гнучка передача 3, збуджувач витрат (вентилятор) 4, електродвигун 5, лабораторний автотрансформатор 6, мікроманометр з похилою трубкою 7, поліхлорвінілова трубка 8, штатив 9.

Напірна трубка призначена для відбору динамічного тиску потоку повітря, який рухається по трубопроводу. Параметри трубки: зовнішній діаметр 4,0 мм, внутрішній діаметр 3,0 мм, довжина 120,0 мм.

Трубопровід, який використовується в лабораторній роботі, має прямокутну форму поперечного перерізу з розмірами 120x80 мм. Довжина трубопроводу 780 мм.

Збуджувач витрат призначений для створення потоку повітря в трубопроводі. Він являє собою вентилятор з електроприводом. Потік повітря в

трубопроводі створюється при обертанні ротора вентилятора. Величина витрат повітря в трубопроводі визначається частотою обертання ротора вентилятора і відповідно частотою обертання ротора електродвигуна. Зміною частоти обертання ротора електродвигуна досягається зміна витрат повітря в трубопроводі.

Лабораторний автотрансформатор (ЛАТР) призначений для регулювання напруги, яка подається на електродвигун збуджувача витрат. Зміна напруги, яка подається на електродвигун, приводить до зміни частоти обертання ротора вентилятора а, отже, і до зміни витрат повітря в трубопроводі. В роботі використовується лабораторний трансформатор типу ЛАТР- 2М, 220В, 50Гц.

Мікроманометр з похилою трубкою призначений для виміру динамічного тиску в трубопроводі, який відбирається напірною трубкою. В лабораторній роботі використовується мікроманометр з похилою трубкою типу ММН-2400(5)-1,0, який заповнений етиловим спиртом (густина $\rho=0,8095 \cdot 10^3$ кг/м³).

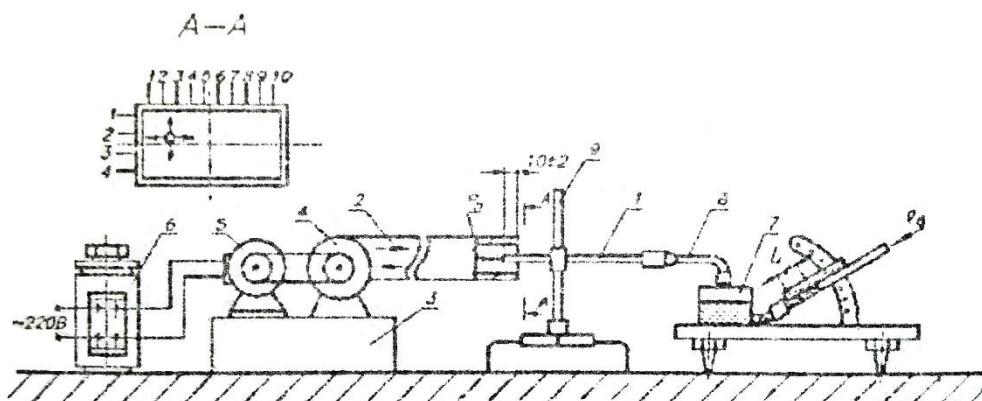


Рис. 6.1. Принципова схема лабораторної установки

6.5. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи

Включення в електричну мережу лабораторного автотрансформатора здійснює викладач. Після перевірки викладачем працездатності всього лабораторного обладнання студенти приступають до виконання лабораторної

роботи за наступною послідовністю:

1. Плавним обертання ручки лабораторного автотрансформатора забезпечити подавання на електродвигун збуджувача витрат напругу в межах (160 ± 10) В.

2. Вертикальним переміщенням вимірювальної рамки штативу та горизонтальним переміщенням штативу по поверхні стола забезпечити установлення напірної трубки в область перерізу трубопроводу, яка визначається координатами – першою точкою першого горизонтального перерізу. Глибина вводу напірної трубки в трубопровід (10 ± 2) мм.

Поздовжня вісь напірної трубки повинна бути розташована перпендикулярно торцевому зрізу трубопроводу.

3. Встановити похилу трубку мікроманометра у положення, яке відповідає значенню сталої приладу $k=0,2$. Визначити величину L - переміщення вільної поверхні робочої рідини в похилій трубці відносно нульової поділки шкали. Одержані значення занести в таблицю 6.1.

4. Послідовним переміщенням напірної трубки вздовж першого горизонтального перерізу визначити величину L_i в точках 2, 3, 4,..., 10. Одержані результати занести у верхній рядок таблиці 6.1.

Провести визначення L_i для усіх 10 точок другого, третього і четвертого горизонтальних перерізів. Одержані значення занести у рядки, які відповідають першому циклу вимірювань. Один повний цикл вимірювань відповідає виконанню вимірювань в усіх 40 контрольних точках торцевого поперечного перерізу трубопроводу. Загальна кількість циклів вимірювань при виконанні лабораторної роботи – не менше трьох для однієї напруги, яка подається на електродвигун збуджувача витрат.

5. Вивести трубку (приймач тиску) з трубопроводу. Відкрити отвір в боковій поверхні трубопроводу. Завести трубку в отвір. Поліхромвінілову трубку 8 зняти з штуцера чашки мікроманометра і з'єднати з штуцером, що розташований на верхній частині похилої трубки мікроманометра.

6. Крок за кроком вводячи трубку скрізь боковий отвір в трубопроводі, слід знімати показання мікроманометра з похилою трубкою. Один крок переміщення трубки визначається відстанню між двома сусідніми кільцевими рисками на зовнішній поверхні трубки.

Доходячи до останньої десятої кільцевої риски та знявши показання з мікроманометра з похилою трубкою, слід змінити напрям руху трубки. Трубку крок за кроком виводять з трубопроводу. Кожен крок виводу трубки передбачає реєстрацію показань мікроманометра з похилою трубкою.

Так виконується прямий та зворотній рух трубки. Це є один цикл вимірювань. Загальна кількість циклів дорівнює трьом.

Отримані результати слід заносити у таблицю 6.2. По завершенні вимірів слід визначити середні значення статичного вакууметричного тиску та отримані данні занести в останній рядок таблиці.

Середнє значення статистичного тиску для кожної кільцевої риски слід визначати за формулою:

$$P_{\text{ст},n} = \frac{\sum_{i=1}^6 P_{n,i}}{6},$$

де $P_{\text{ст},n}$ – середнє значення статистичного тиску для кільцевої риски № n ,

$P_{n,i}$ – статистичний тиск для кільцевої риски № n та відповідного параметра циклу i .

Значення статистичного вакууметричного тиску визначається за формулою:

$$P_{n,i} = 0,2 L,$$

де L – переміщення вільної поверхні рідини в похилій трубці відносно нульової відмітки шкали.

7. Використовуючи середні значення статичного тиску слід побудувати графік в координатах: № кільцевої риски (вісь абсцис) – статичний тиск (вісь ординат).

8. Результати вимірювань.

Таблиця 6.2

Результати вимірювань

Тиск	Цикли вимірювань		i	№ кільцевої риски - n									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{ст}$	1	Пр.х	1										
		Зв.х	2										
	2	Пр.х	3										
		Зв.х	4										
	3	Пр.х	5										
		Зв.х	6										
	Середнє значення												

6.6. Статистична обробка результатів вимірювань

Обробку результатів вимірювань проводити за наступною послідовністю:

1. Підготувати таблиці 6.3 і 6.4:

Таблиця 6.3

Динамічний тиск P_d , Па

Горизонт. переріз, №	Цикл вимір.	Точки горизонтальних перерізів, N									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1										
	2										
	3										
2	1										
	2										
	3										
3	1										
	2										
	3										
4	1										
	2										
	3										

Таблиця 6.4

Осьові складові швидкості точок горизонтальних
перерізів потоку V , м/с

Горизонт. переріз, №	Цикл вимір.	Точки горизонтальних перерізів, N									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1										
	2										
	3										
	$V_{ср1}$										
2	1										
	2										
	3										
	$V_{ср2}$										
3	1										
	2										
	3										
	$V_{ср3}$										
4	1										
	2										
	3										
	$V_{ср4}$										

2. Визначити для усіх точок горизонтальних перерізів динамічний тиск за формулою

$$P_{\partial i} = k \cdot L_i \cdot 9,8, \text{ (Па)}$$

де k – стала мікроманометра з похилою трубкою ($k=0,2$);

L_i – значення, які наведені в таблиці 6.1.

Одержані значення P_{∂} внести у таблицю 6.2.

3. Визначити для усіх точок горизонтальних перерізів значення осьових складових швидкості потоку за формулою:

$$V_i = \sqrt{\frac{2 \cdot P \partial_i}{\rho}},$$

де V_i – осьова складова швидкості потоку у відповідних точках горизонтальних перерізу;

ρ – густина повітря, $\rho=1,205 \text{ кг/м}^3$

Одержані значення V_i внести у таблицю 6.3 з врахуванням відповідних горизонтальних перерізів, циклів вимірювань, номерів точок.

Для кожної точки з кожних 4 горизонтальних перерізів визначити для трьох циклів вимірювань середнє значення швидкості потоку за формулою:

$$V_{сep_i} = \frac{\sum_{i=1}^3 V_i}{3}$$

4. За середніми значеннями швидкості потоку у кожній точці побудувати епюри швидкостей потоку для всіх 4 горизонтальних перерізів. Вказати масштаб, наприклад $M \text{ 1м/с:3 мм}$.

5. Визначити середню швидкість потоку повітря за формулою:

$$V_{сep} = \frac{\sum_{i=1}^{40} V_{сep_i}}{40}$$

6. Визначити площу поперечного перерізу внутрішнього каналу прямокутного трубопроводу S_T .

7. Визначити об'ємні та масові витрати повітря в трубопроводі прямокутного поперечного перерізу за формулою:

$$Q = V_{сep} \cdot S_T,$$

$$Q_M = \rho \cdot Q = \rho \cdot V_{сep} \cdot S_T.$$

6.7. Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

Звіт про виконання лабораторної роботи повинен включати наступні розділи:

1. Мета лабораторної роботи.
2. Короткі теоретичні відомості про об'єкт вивчення.
3. Опис та схема лабораторної установки.
4. Результати вимірювань: таблиці 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, епюри швидкостей, значення Q та Q_M та графік у відповідності до пункту 7 підрозділу 6.5.

Рекомендована література: [7, 12, 15]

Лабораторна робота №7

Вивчення та градуювання тензорезисторного стержневого вимірювального перетворювача тиску

Мета лабораторної роботи:

ознайомитися з устроєм, принципом дії і конструкцією тензорезисторних стержневих вимірювальних перетворювачів тиску (ВПТ);

вивчити і освоїти основні положення розрахунку тензорезисторних ВПТ;

набути практичних навичок вимірювання тиску тензорезисторними ВПТ;

набути практичних навичок проведення градуювання тензорезисторних ВПТ.

7.1. Короткі теоретичні відомості

Тензорезисторний ВПТ, який розглядається в даній лабораторній роботі, має структурну і принципову схеми, які зображено на рис.7.1. і 7.2. Тензорезисторний ВПТ містить в собі гнучку мембрану 1, пружний елемент 2 виконаний у вигляді порожнього стержня, провідні тензорезистори 3 і вимірювальний ланцюг. Вимірювальний тиск P діє на мембрану, яка перетворює тиск в зусилля F і передає це зусилля на стержень. Стержень деформується і одночасно деформуються тензорезистори, наклеєні на нього. При цьому відбувається перетворення зусилля F в деформацію поверхонь пружного елемента ΔL і відповідно в деформацію тензорезисторів, що призводить до зміни їх опору ΔR . Зміна опорів тензорезисторів викликана зміною вихідного сигналу вимірювального ланцюга.

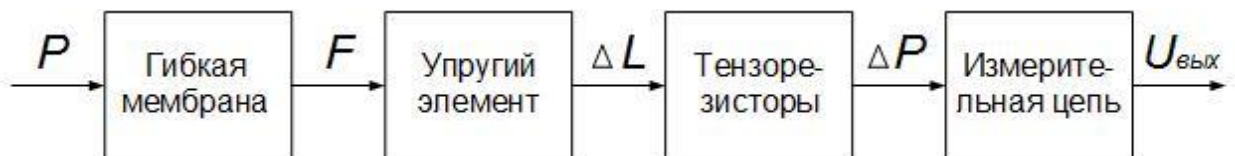


Рис.7.1. Структурна схема тензорезисторного стержневого ВПТ

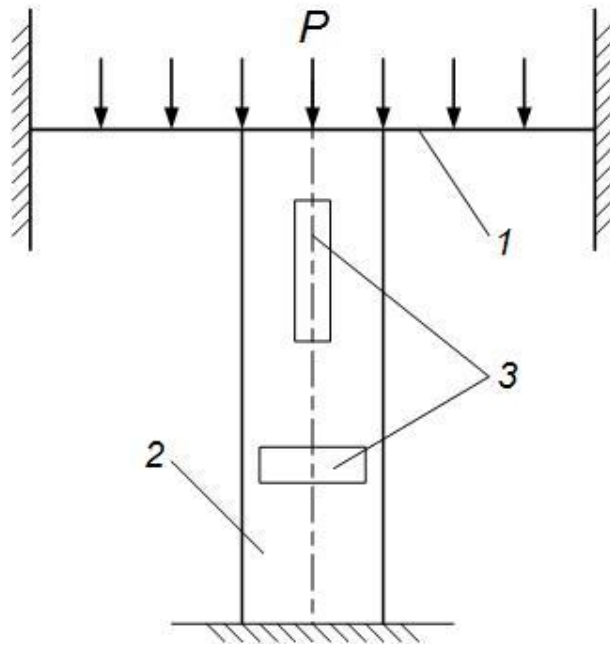


Рис. 7.2. Тензорезисторний стержневий ВПТ

З огляду на структуру і склад градуировочного ВПТ, в методичні вказівки включені окремі відомості про застосовувані пружні елементи, тензорезистори і вимірювальні схеми.

Мембрана в розглянутих ВПТ використовується для перетворення тисків у зусилля.

$$F = P \cdot S_{\text{эф}}, \quad (7.1)$$

де P - змінюваний тиск, $S_{\text{эф}}$ - ефективна площа мембрани.

Для плоскої мембрани

$$S_{\text{эф}} = \frac{\pi}{4} \cdot (r + r_0)^2, \quad (7.2)$$

Для гофрованої мембрани

$$S_{\text{эф}} = \frac{\pi}{3} \cdot (r^2 + rr_0 + r_0^2). \quad (7.3)$$

де r – зовнішній радіус мембрани; r_0 – зовнішній радіус жорсткого центру.

Стержень в розглянутих ВПТ використовується для компенсації зусилля, створюваного мембраною, і для перетворення зусилля в деформацію.

У тензорезисторних ВПТ застосовуються як суцільні, так і порожнисті пружні стержні постійного перетину. Зв'язок між поздовжнім зусиллям, чинним на стержень, і відносною поздовжньою деформацією стержня

$$\varepsilon_l = \frac{F}{S_{CT} \cdot E} = S_{CT}' \cdot F, \quad (7.4)$$

де ε_l – відносна поздовжня деформація стержня; F - зусилля, що діє на стержень; S_{CT} – площа поперечного перерізу стержня; E - модуль пружності матеріалу стержня; S_{CT}' – чутливість стержня.

Зв'язок між зусиллям і поперечною деформацією стержня може бути представлена у вигляді [14]

$$\varepsilon_d = \frac{\mu F}{S_{CT} E} = S_{CT}'' F, \quad (7.5)$$

де ε_d – відносна поперечна деформація; μ – коефіцієнт Пуассона.

В обох випадках відносні деформації постійні по довжині стержня і не залежать від його довжини.

У загальному випадку при створенні тензорезисторних ВПТ можуть бути використані як окремо поздовжня і поперечна деформації, так і комбінації цих деформацій. Чутливість стержня може приймати будь-які значення між S_{CT}' і S_{CT}'' .

Вираз, що визначає функцію перетворення стержня, може бути представлено у вигляді [14]

$$\varepsilon_{CT} = \frac{B_{CT}}{S_{CT} E} \cdot F, \quad (7.6)$$

де B_{CT} – конструктивний коефіцієнт чутливості стержня

$$B_{CT} = \cos \alpha - \mu \sin \alpha, \quad (7.7)$$

α – кут між вимірювальною (поздовжньою) віссю тензорезистора і стержня.

Аналіз виразу (7.7) показує, що $B_{CT} = 1$ при використанні тільки поздовжніх деформацій (тензорезистор встановлений уздовж утворюючої стержня) і рівний коефіцієнту Пуассона з протилежним знаком при використанні тільки поперечних деформацій (тензорезистор встановлений поперек утворюючої стержня). В інших випадках установки тензорезистора конструктивний коефіцієнт чутливості матиме проміжні значення в діапазоні від 1 до значення коефіцієнта Пуассона.

Чутливість стержня, як перетворювача зусилля в деформацію, визначається виразом

$$S'_{CT} = \frac{B_{CT}}{S_{CT}E}. \quad (7.8)$$

Наведені формули справедливі як для суцільних, так і для порожніх стрижнів.

Підвищення чутливості ВПТ досягається застосуванням стержнів з матеріалів з меншим модулем пружності і зменшення площі їх поперечного перерізу.

Тензорезистори виконуються у вигляді решітки з тонкого дроту ($\varnothing 0,01 \dots 0,05$ мм) або тонкої фольги ($h = 0,004 \dots 0,012$ мм), пластинки монокристала з напівпровідникового матеріалу, тонкої напівпровідникової плівки, утвореної напиленням у вакуумі.

Дротові тензорезистори (рис. 7.3.) - найбільш вивчені і широко поширені в тензорезисторній техніці.

Решітка 1 з дроту, виконана у вигляді ряду петель, закріплена за допомогою клею на підкладці 3. До кінців решітки припаяні виходи 4, що з'єднують тензорезистор з вимірювальною схемою. В якості підкладки використовуються ізоляційні матеріали: папір, лакова плівка, тканина та ін. Тензорезистор приклеюється на вільну поверхню пружного елемента в тому місці, де необхідно виміряти поверхневу деформацію. Завдяки жорсткому зв'язку між

тензорезистором і досліджуваною поверхнею, а також незначною жорсткістю тензорезистора, у всіх напрямках деформація тензорезистора дорівнює деформації поверхні пружного елемента, розташованого під решіткою тензорезистора.

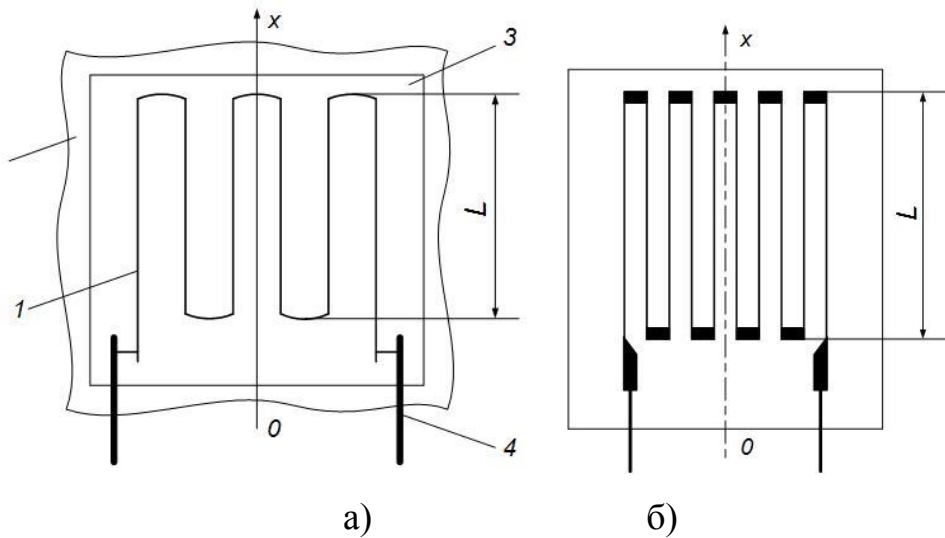


Рис. 7.3. Тензорезистор: а - дрітаний, б - фольговий

Чутливість тензорезистора до деформацій характеризується відношенням зміни його опору, під дією деформації до відносної деформації. Відносна зміна опору тензорезистора визначається формулою

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} \cdot (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (7.9)$$

де ΔR – зміна опору тензорезистора; R – номінальний активний опір тензорезистора; Δl – деформація тензорезистора в напрямку вимірювальної осі; l – початкова довжина дроту; μ – коефіцієнт Пуассона; $\Delta \rho$ – зміна питомого опору матеріалу дроту тензорезистора; ρ – початковий питомий опір матеріалу дроту.

Основні характеристики тензорезистора - номінальний активний опір R , база L і коефіцієнт тензочутливості K_T :

$$K_T = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}. \quad (7.10)$$

В якості матеріалів для дротяних тензорезисторів використовуються константан ($K_T=1,7\dots2,1$), ніхром ($K_T=2,1\dots2,3$), елінвар ($K_T=3,2\dots3,5$), адванс ($K_T=2,1$) і ін.

Габаритні розміри дротяних тензорезисторів складають $(1\dots100)\times(0,5\dots10)\times(0,05\dots0,2)$ мм. Їх маса не перевищує 0,05 г. Номінальний активний опір дротяних тензорезисторів знаходиться в межах 50...700 Ом.

На відміну від дровових, фольгові тензорезистори мають решітку не круглого, а прямокутного перетину. Переважна більшість фольгових тензорезисторів виготовляється з константанової фольги товщиною 5; 10, 12; 16 мкм і вище методом фототравлення. Даний метод дозволяє створювати фольгові тензорезистори практично будь-якої форми. Фольгові тензорезистори володіють вищою в порівнянні з дротяними тензорезисторами тепловіддачею, що дозволяє жити їх великим струмом і тим самим підвищувати чутливість вимірювальної схеми. Наявність широких поперечних перемичок в фольгових тензорезисторах практично виключає вплив деформації, перпендикулярно до вимірювальної осі, на вихідний сигнал тензорезистора. Коефіцієнт тензочутливості фольгових тензорезисторів становить 2,0...2,2. Номінальний опір 50...400 Ом.

Вимірювальні ланцюги тензорезисторних ВПТ. У більшості випадків при застосуванні тензорезисторних ВПТ використовуються мостові вимірювальні ланцюги. Під впливом тиску змінюється опір або одного плеча мостового ланцюга, або двох, або всіх чотирьох. Вхідною величиною вимірювального ланцюга є відношення зміни опору плечей. Вихідною величиною ланцюга, що несе інформацію про вимірювану величину, є зміна напруги.

Функція перетворення мостової схеми з одним робочим плечем може бути записана у вигляді

$$U_{\text{вих}} = U_{\Pi} \frac{k}{k+1} \cdot \frac{\varepsilon_1}{k+1+\varepsilon_1}, \quad (7.11)$$

де $U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга вимірювального ланцюга; U_{Π} – напруга живлення;

$k = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ – коефіцієнт симетрії вимірювального ланцюга; ε_1 – відносна зміна опору R_1 .

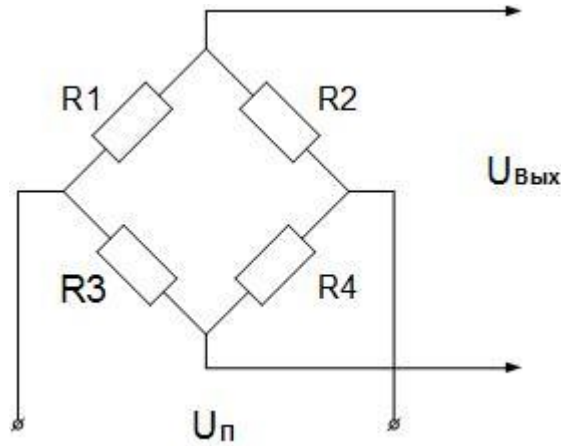


Рис. 7.5. Мостова електрична схема вимірювального ланцюга

У випадках зміни опору R_2 функція перетворення мостового ланцюга буде відповідати висловом

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{k}{k+1} \cdot \frac{-\varepsilon_2}{k+1-\varepsilon_2}. \quad (7.12)$$

Якщо робочим опором буде R_3 або R_4 , функція перетворення визначається відповідно виразами (7.11) і (7.12), тільки зі зворотними знаками.

Якщо під дією вимірюваної величини опори R_1 і R_4 збільшаться на $\varepsilon_1 R_1$ і $\varepsilon_4 R_4$, а опори R_2 і R_3 зменшуються на $\varepsilon_2 R_2$ і $\varepsilon_3 R_3$, тобто вимірювальний ланцюг має чотири робочих плеча, функція перетворення матиме вигляд

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{k(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_1 \varepsilon_4 - \varepsilon_2 \varepsilon_3)}{(k+1)(k+1+k\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - k\varepsilon_3 + \varepsilon_4) + (k\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_4 - k\varepsilon_3)}. \quad (7.13)$$

При $\varepsilon_1 \leq 1$, $\varepsilon_2 \leq 1$, $\varepsilon_3 \leq 1$, $\varepsilon_4 \leq 1$ это вираз може бути записано у вигляді

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{k}{(k+1)^2} \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4). \quad (7.14)$$

Чутливість мостового вимірювального ланцюга визначається виразом

$$S' = U_{\Pi} \frac{k}{(k+1)^2}. \quad (7.15)$$

Чутливість мостового вимірювального ланцюга залежить від напруги живлення і співвідношення опор плечей вимірювального ланцюга і не залежить від значень опорів і числа працюючих плечей. Зі збільшенням напруги живлення чутливість ланцюга зростає. Зі збільшенням коефіцієнта k чутливість спочатку збільшується, потім зменшується. Максимальна чутливість спостерігається при $k = 1$ і дорівнює $0,25U_{\Pi}$.

В реальних конструкціях ТВПТ вимірювальний ланцюг доповнюється елементами, призначеними для обліку умов експлуатації, впливу з'єднувальних ліній, забезпечення можливості регулювання чутливості, калібрування і т.д. (рис. 7.6). У загальному випадку кожне плече моста може бути утворене з декількох тензорезисторів, включених паралельно, послідовно або паралельно-послідовно. Опір робочих плечей змінюється при впливі температури, що приводить до зміни початкового рівня вихідної напруги вимірювального ланцюга. Для компенсації цього впливу в плече включають опір R_{β} , який змінюється при дії температури так, щоб початковий розбаланс вимірювального ланцюга залишався постійним.

Для регулювання чутливості ТВПТ в процесі його виготовлення в діагональ живлення включають додатковий опір $R_{доб}$.

Балансуючий опір R_{δ} служить для підгонки початкового розбалансу вимірювального ланцюга. Опори $R_{\delta 0}, R_{\delta 1}, R_{\delta 2}$ складають схему балансування ТВПТ і призначені для установки заданого початкового розбалансу вимірювального ланцюга.

Опори $R_{Л1}, R_{Л2}, R_{Л3}, R_{Л4}$, є еквівалентними опорами сполучних проводів і визначаються типом і довжиною з'єднувального кабелю між ТВПТ і подальшим

перетворювачем.

Тензорезистор, компенсаційні, додаткові і балансуючі опори монтуються всередині ТВПТ. Інші елементи, як правило, входять до складу перетворювача, з яким працює ТВПТ.

ТВП в більшості випадків використовується в складі вимірювальної системи, що містить пристрої перетворення і реєстрації.

Для полегшення оцінки результатів вимірювання в тих випадках, коли градування всієї вимірювальної системи утруднено, в вимірювальну ланцюг ТВПТ вводять калібрований опір R_K , що дозволяє створити еталонний електричний вплив на реєструючу частину вимірювального ланцюга, еквівалентну певним фіксованим навантаженням. Опір R_K підключається до вимірювального ланцюга короткочасно для реєстрації сигналу, відповідного фіксованим значенням навантаження. При цьому з'являється можливість оцінки чутливості всього тракту вимірювання, що істотно полегшує розшифровку результатів вимірювання. Оскільки в якості калібрувальних опорів використовуються прецизійні резистори, то калібрування тракту вимірювання безпосередньо перед виконанням вимірювань дозволяє підвищити їх точність.

Зазначені елементи вимірювального ланцюга впливають на градувальну характеристику ТВПТ. Тому практично завжди її визначають експериментально для кожного ТВПТ. Для заданих значень і видів навантаження визначають або струм, або вихідну напругу. Отриману характеристику використовують в подальшому для розшифровки результатів вимірювань.

Функція перетворення реальної вимірювального ланцюга за умови $\varepsilon_1 \leq 1$, $\varepsilon_2 \leq 1$, $\varepsilon_3 \leq 1$, $\varepsilon_4 \leq 1$ має такий вигляд:

$$U_{\text{вих}} = E \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_n} \cdot \frac{R_n}{R_n + R_{\text{вих}} + R_{\text{дон}}}, \quad (7.16)$$

де E — ЕРС джерела живлення вимірювального ланцюга; $R_{\text{вх}}$ — вхідний опір моста; опір ланцюга харчування; R_n — опір навантаження; вихідний опір моста;

$R_{дон}$ — додаткові опори, що включаються послідовно з опором навантаження (опором кабелю).

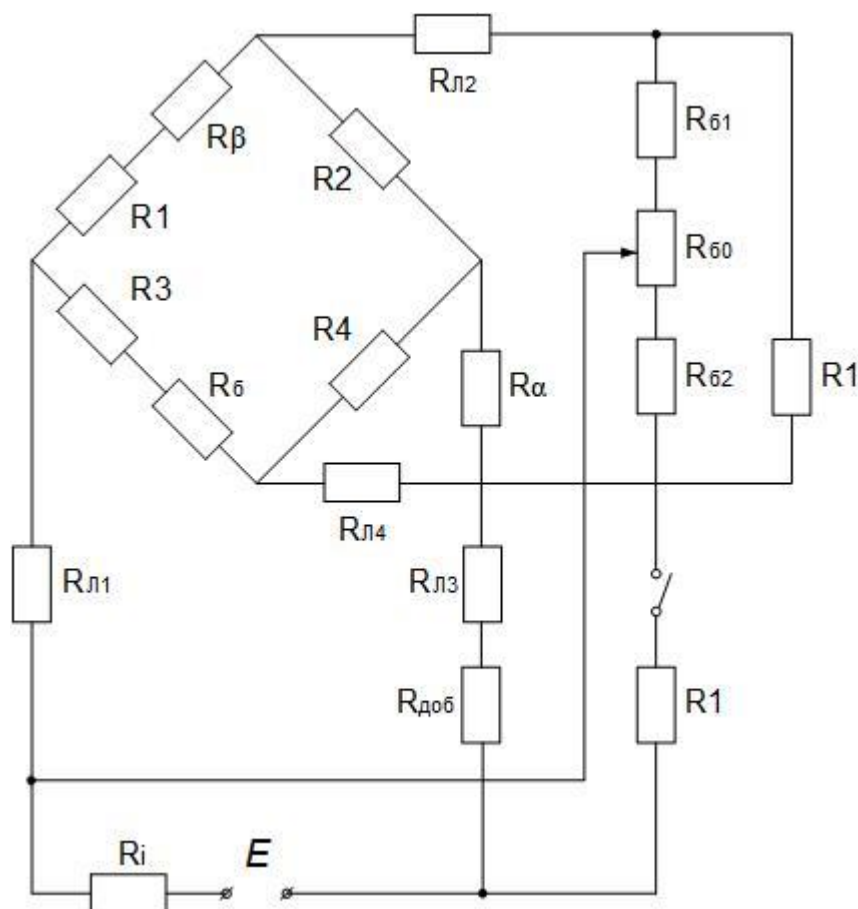


Рис. 7.6. Реальний мостовий вимірювальний ланцюг тензорезисторного ВПТ

Внаслідок неідентичності характеристик застосовуваних тензорезисторів в якості робочих тензорезисторів використовують не один, а декілька тензорезисторів. При цьому, якщо на пружному елементі є зони з деформаціями розтягування і стиснення з відомим співвідношенням між ними, доцільно розташовувати тензорезистори таким чином, щоб тензорезистори R_2 і R_3 відчували деформацію стиснення, а R_1 і R_4 - деформацію розтягування (рис. 7.7). У цьому випадку здійснюється компенсація температурної похибки і в 4 рази збільшується чутливість.

Якщо невідомо співвідношення між деформаціями стиснення і розтягування (між поздовжньої і поперечної деформаціями), тензорезистори R_1 и R_4 встановлюють на компенсаційну пластину, виготовлену з того ж матеріалу, що і пружний елемент, встановлений на об'єкт вимірювання так, щоб забезпечувався хороший температурний контакт без передачі деформації.

Кінцівки дротів тензорезисторів припаюють до контактної колодки $K_{\text{л}}$ яка служить для під'єднання ВПТ до вимірювального ланцюга. Для захисту тензорезисторів від впливу навколишнього середовища і для забезпечення стійкості до механічних чинників, що впливають на тензорезистори і монтажну схему покривають спеціальним герметизуючим складом.

Функція перетворення для тензорезисторного стержневого ВПТ в загальному випадку зможе бути представлена у вигляді [14]:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{k}{(k+1)^2} \cdot \frac{n C_z K_T}{S_{\text{сг}} E} \cdot \frac{\pi (r + r_0)^2}{4} P, \quad (7.17)$$

де C_z - еквівалентний коефіцієнт деформації, що характеризує ступінь використання деформацій робочих зон пружного елемента

$$C_z = \frac{B_1 C_1 + B_2 C_2 + \dots + B_n C_n}{n}, \quad (7.18)$$

де $B_1, B_2 \dots B_n$ - конструктивні коефіцієнти чутливості зон деформацій;

$C_1, C_2 \dots C_n$ - коефіцієнти використання деформацій відповідних зон деформацій; n - кількість використовуваних зон деформацій або кількість робочих тензорезисторів.

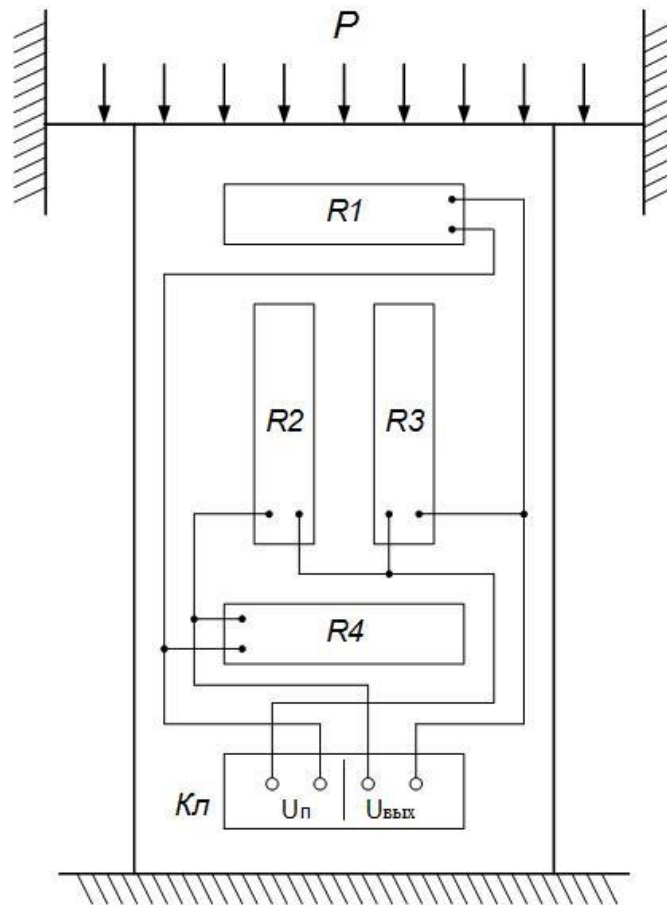


Рис. 7.7. Схема установки тензорезисторів на стержні

Коефіцієнт використання деформацій показує, яка частка максимальних деформацій зони використовується при роботі ВПТ. Для стержня постійного перетину при повному використанні зон деформацій коефіцієнт $C_n = 1$. Еквівалентний коефіцієнт деформацій для стержня, на якому встановлено чотири тензорезистора, два з яких вимірюють деформацію одного знака, а два інших - деформацію іншого знака:

$$C_z = \frac{B_1 C_1 + B_2 C_2 + B_3 C_3 + B_4 C_4}{4}, \quad (7.19)$$

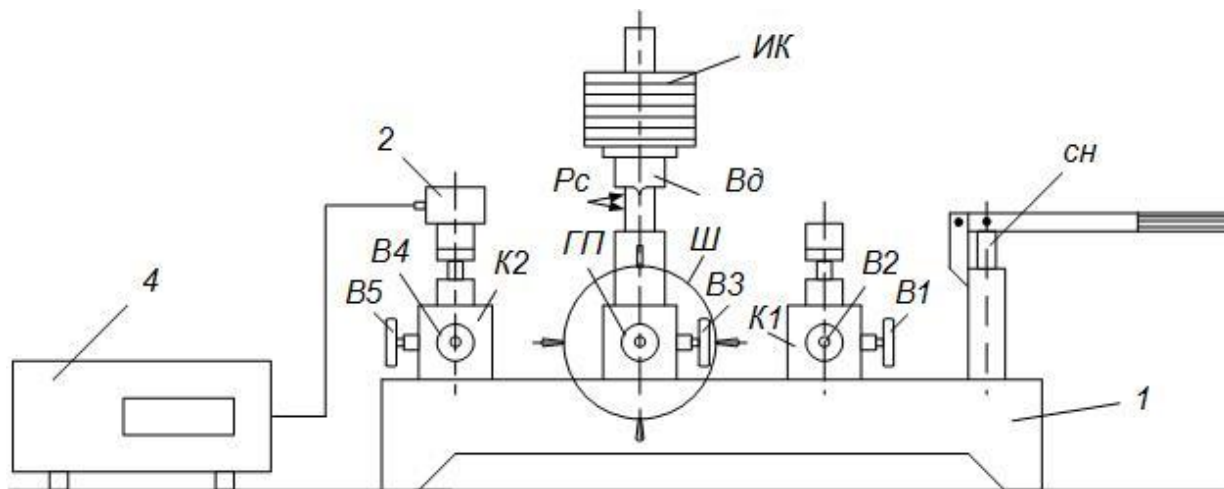
$$B_1 = B_3 = 1; B_2 = B_4 = 1; C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1.$$

Після підстановки наведених значень B_1 і C_1 в (7.19) отримаємо $C_z = 0,65$.

Еквівалентний коефіцієнт деформацій характеризує ефективність перетворення вимірювальної силової величини в вихідну деформацію. Найбільш

За допомогою стрижневих тензорезисторних ВПТ забезпечується вимір постійних і змінних тисків в межах 0,6 ... 60 МПа. Для вимірювання тиску нижче 0,6 МПа застосовуються тензорезисторні ВПТ з кільцевими пружними елементами.

Робоча схема градуировочного стенду показана на рис. 7.8. В якості ВПТ, для градуювання, взято стержневий тензорезисторний ВПТ типу ЛХ-412 (поз.2). Необхідний тиск в системі створюється за допомогою вантажопоршневої манометра 1 типу МП-600. Для визначення тиску, який діє на мембрану ВПТ, може бути використаний зразковий манометр. Напруга на виході ВПТ вимірюється за допомогою вимірювального приладу 4.



Тензорезисторний ТВП типу ЛХ - 412 призначений для вимірювання швидкозмінних тисків рідких і газоподібних середовищ в частотному діапазоні від 0 до 1500 Гц. Діапазон вимірювання ТВПТ становить 0 ... 60 МПа. Напруга живлення 12 В постійного струму.

81

на рис. 7.10. Пружний елемент 2 являє собою циліндричний трубчатий стержень, на внутрішній і зовнішній поверхнях якого наклеєні дротові тензорезистори 3, які з'єднані в мостову схему.

Мембрана 1 по контуру припаяна до корпусу 4 і центральною частиною спирається на стержень. Корпус і мембрана виконані з нержавіючої сталі марки 12Х18Н9Т.

Тензорезистори виготовлені з константанового дроту діаметром 40 мкм. Опір кожного тензорезистора (400 ± 10) Ом. У діагональ живлення (див. рис. 7.10) мостової схеми встановлений мідний дротовий опір R_α , що служить для компенсації зміни чутливості від зміни температури. Опір R_β призначений для компенсації температурної похибки нуля.

Прилад автоматичний слідкуючого врівноваження КСТ4 призначений для вимірювання і запису сигналів тензорезисторних датчиків. Прилад складається з наступних основних вузлів: блоку живлення, створює напруги 9, 12, 24 В для живлення тензорезисторних ланцюгів; підсилювача, призначеного для посилення напруги вимірювальної діагоналі датчика; схеми слідкуючого врівноваження, перетворюючої напругу підсилювача в переміщення каретки з показником шкали і пером реєстратора. Основна похибка КСТ4 становить 0,25%, за показаннями і 0,5% по реєстрації.

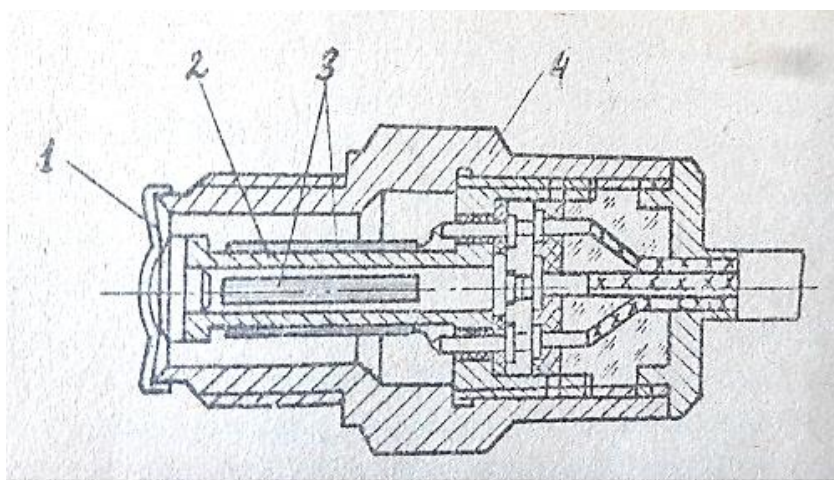


Рис. 7.9. ВПТ типу LX-412

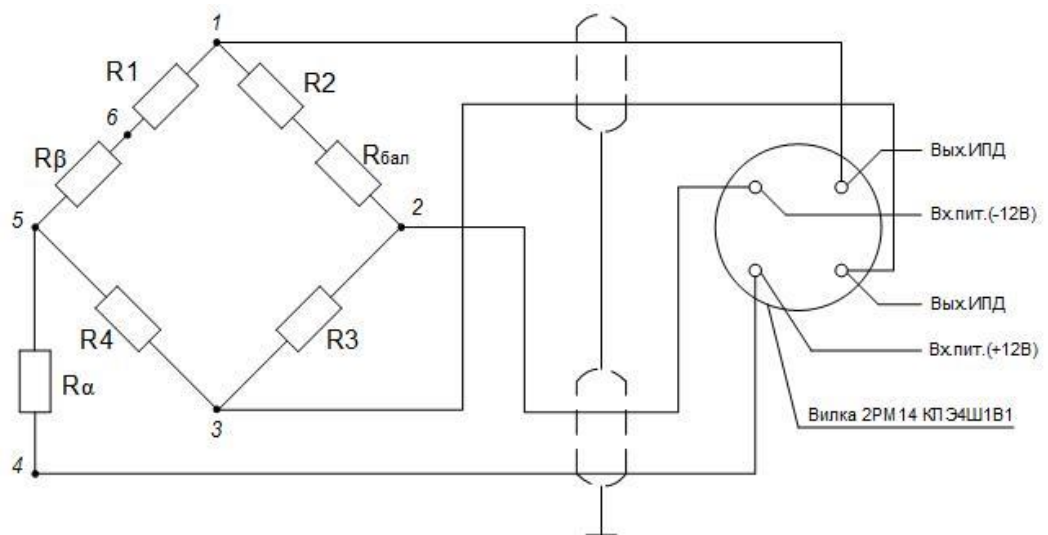


Рис. 7.10. Мостова ВРТ типу LX-412

Вантажопоршневої манометр складається (див. рис.7.8) з вимірювальної колонки ИК, скальчатого насоса СН, призначеного для заповнення внутрішніх порожнин манометра робочою рідиною і створення попереднього тиску в гідросистемі; гвинтового гідравлічного преса ДП, призначеного для плавного зміни тиску в системі, двох колонок К1 і К2 для установки градуювальних і досліджуваних манометрів і ВРТ, ємності для робочої рідини, запірних вентилів В1 ... В5, сполучних трубопроводів і трьох зворотних клапанів (на рис. 7.8 не показані).

Призначення вентилів: В1 - відключає скальчатий насос; В2 - відключає колонку К1; В3 - відключає вимірювальну колонку; В4 - відключає колонку К2; В5 - перекриває канал скидання тиску.

При виконанні безпосередньо вимірювань поршню ИК вантажопоршневого манометра з розташованими на ньому вантажами вручну надається обертальний рух, а двохгранна вершина вантажопідйомного пристрою встановлюється між кільцевими рисками, покритими червоною фарбою. Проміжок між кільцевими рисками визначає величину робочого ходу поршня. Установка поршня в межах робочого ходу досягається плавним обертанням штурвала ГП. Обертання поршню ИК надається вручну. Частота обертання по інерції поршня повинна складати 30 ... 120 об / хв. При малих тисках частота обертання повинна бути

більшою з метою збільшення тривалості обертання поршня по інерції.

При установці поршня ИК, який обертається без вантажів в межах його робочого ходу, в гідросистемі буде створено тиск, що дорівнює 1 МПа. При установці в робочому положенні поршня з вантажами тиск під поршнем, визначається наступним виразом:

$$P = (P_{r1}n_1 + P_{r2}n_2 + 10) \cdot 0.1, \text{ МПа}$$

де P_{r1}, P_{r2} - тиски, зазначені на вантажах, кгс/см²; n_1, n_2 - кількість відповідних вантажів.

Дозволяється при виконанні лабораторної роботи визначати тиск в гідросистемі вантажопоршневого манометра за допомогою зразкового деформаційного манометра, який може бути встановлений на колонку К1.

7.3. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи

Тензорезисторний стержневий ВПТ градується шляхом зіставлення показань самопишущого приладу КСТ-4 з тиском, що задається за допомогою вантажопоршневого манометра.

У лабораторній роботі ТВПТ (ЛХ-412) встановлений на колонку К2 вантажопоршневого манометра і підключений до вимірювального приладу 4.

Починати виконання лабораторної роботи слід з прогріву самопишущого приладу і всієї вимірювальної схеми. Це досягається підключенням приладу до електромережі лабораторії ($U = 220\text{В}$, $f = 50\text{ Гц}$), його включенням і витримкою тривалістю 5 хв. У період прогріву вимірювального ланцюга необхідно відкрити вентилі В1, В3, В4, В5, закрити вентиль В2 і обертанням штурвала ГП в напрямку проти руху годинникової стрілки до упору встановити плунжер ГП в початкове положення. Якщо на вантажопідйомний пристрій знаходяться вантажі, їх необхідно зняти.

Після прогріву вимірювального ланцюга і виконання всіх зазначених дій, необхідно зняти показання вимірювального приладу 4, які відповідають

нульому надлишковому тиску в гідросистемі.

Безпосередньо градування здійснюється в такій послідовності: за допомогою вантажопоршневого манометра встановлюється заданий тиск і після цього візуально знімаються показання з вимірювального приладу. Виміри повинні бути проведені при тисках 1,2,3,4,5,6,7,8 МПа (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 кгс/см²), при поступовому східчастому підвищенні тиску і на тих же відмітках при зниженні тиску. При максимальному тиску (8 МПа), повинна бути зроблена витримка тривалістю 5 хв, після чого повинен слідувати зворотний хід. Загальна кількість циклів вимірювань (прямий-зворотний хід) має дорівнювати трьом.

Тиск за допомогою вантажопоршневого манометра збільшується в такій послідовності:

- 1) закрити вентилі В2 і В5;
- 2) відкрити вентилі В1, В3, В4;

3) за допомогою СН, здійснюючи рукояткою насоса коливальні рухи у вертикальній площині, заповнити внутрішню порожнину манометра робочою рідиною; помістити на вантажоприймальний пристрій поршня ІК необхідну кількість вантажів і рукою привести його в обертання;

- 4) плавним обертанням штурвала ГП по ходу руху годинникової стрілки встановити поршень в межах робочого ходу.

Подальше збільшення тиску досягається за необхідним збільшенням кількості вантажів на вантажопідйомний пристрій і установкою за допомогою штурвала ГП поршня ІК, який обертається в межах робочого ходу.

Зменшення тиску досягається необхідним зменшенням кількості вантажів на вантажоприймальний пристрій і установкою за допомогою обертання штурвала ГП проти руху годинникової стрілки поршня ІК в межах його робочого ходу.

Тривалість витримки ВПТ під тиском в межах одного повного циклу не повинна перевищувати 20 хв. Максимальний тиск, що може бути створено в гідросистемі при градуванні тензорезисторного стрижневого ВПТ, визначає

викладач, який проводить лабораторне заняття.

Результати вимірювань необхідно заносити до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1.

Результати вимірювань

ΔP кгс/см ²	Вихідний електричний сигнал U, В					
	1 – й цикл		2 – й цикл		3 – й цикл	
	Пр. хід	Зв. хід	Пр. хід	Зв. хід	Пр. хід	Зв. хід
0						
10						
20						
...						
80						

Після виконання вимірювань необхідно відкрити вентилі В1, В3, В4 і В5, зняти вантажі з вантажопідйомного пристрою, вимкнути вимірювальний прилад і відключити його від електромережі лабораторії.

Результати вимірювань повинні бути оброблені методом найменших квадратів і представлені у вигляді графіка в координатах "тиск - показання вимірювального приладу ($U_{\text{вих}}$)".

7.4. Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

1. Мета роботи.
2. Короткі відомості про тензорезисторні ВПТ.
3. Завдання.
4. Робоча схема.
5. Перелік і коротка характеристика застосовуваних засобів вимірювальної техніки.
6. Результати вимірювань.

7.5. Контрольні питання

1. Вкажіть принцип роботи тензорезисторних ВПТ. Наведіть структурну і принципову схеми.
2. Які пружні елементи застосовуються в даних ВПТ?
3. Які тензорезистори застосовуються в стрижневих тензорезисторних ВПТ? Вкажіть принцип роботи, переваги і недоліки, області застосування.
4. Поясніть роботу мостової вимірювальної схеми. Вкажіть призначення резисторів в реальній мостовій вимірювальній схемі.
5. Запишіть і проаналізуйте функцію перетворення стержневого тензорезисторного ВПТ.
6. Вкажіть області застосування тензорезисторних ВПТ, їх переваги та недоліки.

Рекомендована література: [5, 14]

Лабораторна робота № 8

Вивчення та градуювання напівпровідникового мембранного тензорезисторного вимірювального перетворювача тиску

Мета лабораторної роботи:

ознайомитися з устроєм, принципом дії і конструкцією тензорезисторних мембранних вимірювальних перетворювачів тиску (ВПТ);

вивчити і освоїти основні методи розрахунку тензорезисторних мембранних ВПТ;

ознайомитися з принципом дії і конструктивними особливостями напівпровідникових тензорезисторних ВПТ;

набути практичних навичок вимірювання тисків тензорезисторними напівпровідниковими ВПТ;

набути практичних навичок градуювання тензорезисторних ВПТ.

8.1. Загальні відомості про мембранні напівпровідникові тензорезисторні ВПТ

Досліджуваний в лабораторній роботі тензорезисторний ВПТ створений по структурній схемі, зображеної на рис. 8.1.

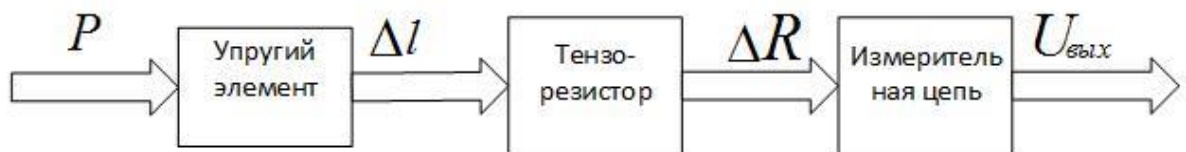


Рис. 8.1. Структурна схема мембранного ВПТ

ВПТ містить пружний елемент, тензорезистори і вимірювальну схему. Вимірювальний тиск P діє на пружний елемент і деформує його. При цьому тиск P перетворюється в деформацію. Одночасно з пружним елементом деформуються закріплені на ньому тензорезистори. Відбувається перетворення деформацій Δl пружного елемента і відповідно деформацій тензорезисторів в

зміну опорів ΔR тензорезисторів. Зміна опорів тензорезисторів призводить до зміни вихідного сигналу вимірювального ланцюга.

В якості пружних елементів в тензорезисторних ВПТ, створених за структурною схемою, зображеною на рис. 8.1, застосовуються плоскі мембрани (рис. 8.2, а), циліндричні оболонки (рис. 8.2, б), конічні оболонки (рис. 8.2, в), півсфери (рис. 8.2, г) і інші оболонки. У цій лабораторній роботі розглядаються тільки мембранні тензорезисторні ВПТ.

У сучасних тензорезисторних ВПТ мембрани використовуються як перетворювачі тиску в деформацію, зусилля, переміщення. У першому випадку, як правило, використовуються плоскі мембрани, жорстко закріплені по контуру; у другому - як плоскі, так і гофровані мембрани; в третьому - в основному гофровані мембрани.

Плоскі мембрани мають затухаючу пружну характеристику, тому в якості робочого прогину зазвичай використовують лише невелику частину можливого переміщення мембрани. При малих прогинах переміщення мембрани пов'язані в основному з вигином матеріалу. Середина площина, рівновіддалена від поверхонь мембрани, майже не подовжується. Характеристика мембрани при цьому близька до лінійної, і для її розрахунку використовується лінійна теорія вигину круглих пластинок.

При збільшенні тиску прогини мембрани стають порівнянними з товщиною. Середина площина мембрани подовжується, що приводить до появи напружень розтягу, порівнянних з напруженнями згину.

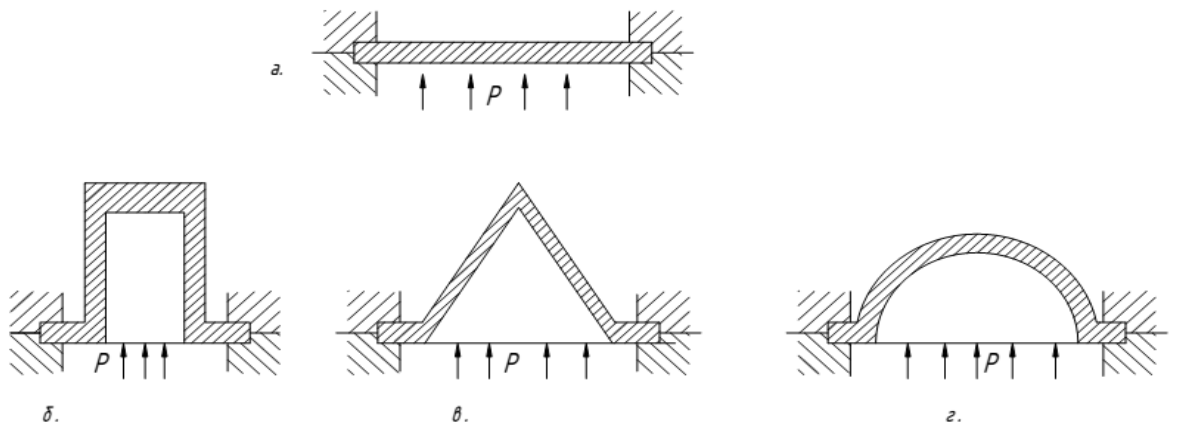


Рис. 8.2. Види пружних елементів тензорезисторів ВПТ

Прогини мембрани при цьому збільшуються повільніше, ніж тиск, а пружна характеристика стає затухаючою. Розрахунок мембрани в області великих переміщень заснований на нелінійній теорії, яка враховує як вигин, так і розтягнення мембрани в серединній поверхні.

У тензорезисторних ВПТ плоскі мембрани працюють, як правило, в умовах малих переміщень. Це дозволяє застосовувати при розрахунках залежності, що враховує тільки вигин серединної поверхні.

Рівняння, яке визначає залежність деформацій зовнішньої поверхні мембрани від тиску, може бути представлене у вигляді

$$\varepsilon_r = \frac{3(\mu^2 - 1)}{8} \cdot \frac{R^2}{Eh^2} \cdot \left(1 - 3\frac{x^2}{r^2}\right)P; \quad (8.1)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{3(\mu^2 - 1)}{8} \cdot \frac{R^2}{Eh^2} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right)P, \quad (8.2)$$

де ε_r , ε_φ – відповідно радіальна і окружна відносні деформації; μ – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності матеріалу мембрани; h – товщина мембрани; x – поточний радіус; r – зовнішній радіус мембрани.

Введемо позначення

$$B_r = 0.375 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \left(1 - 3\frac{x^2}{r^2}\right); \quad (8.3)$$

$$B_{\varphi} = 0.375 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right), \quad (8.4)$$

де B_r – конструктивний коефіцієнт чутливості мембрани при використанні радіальних деформацій; B_{φ} – конструктивний коефіцієнт чутливості мембрани при використанні окружних деформацій.

Залежності B_r и B_{φ} від поточного радіуса показані на рис. 8.3.

Як показує аналіз залежностей (8.3), (8.4) і рис. 8.3, в мембрані можна виділити три зони деформацій. Одна зона розташована в межах $\frac{x}{r} = 0 \dots 1$ і відповідає використанню окружних деформацій. У цій зоні конструктивний коефіцієнт чутливості B_{φ} має максимальне значення в центрі мембрани і дорівнює 0.351. Друга і третя зони деформацій відповідають використанню радіальних деформацій і знаходяться в межах $\frac{x}{r} = 0 \dots 0.568$ і $\frac{x}{r} = 0.563 \dots 1$. Для другої зони максимальне значення конструктивного коефіцієнта $B_r = 0.351$ і для третьої зони $B_r = 0.704$.

В

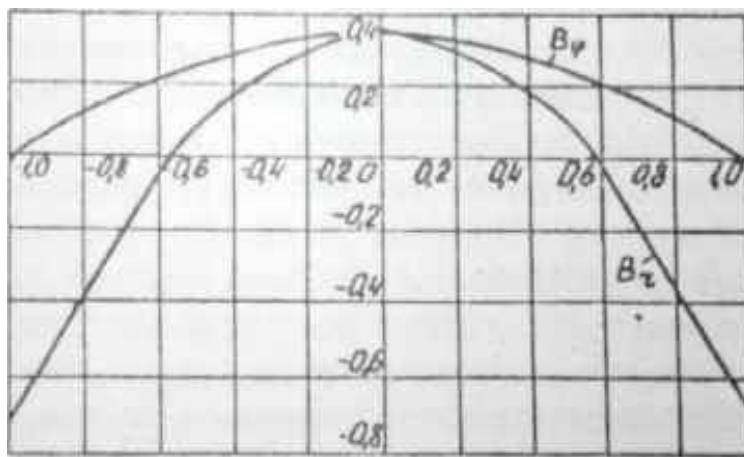


Рис. 8.3. Залежність конструктивних коефіцієнтів чутливості від поточного радіуса мембрани

Графіки конструктивних коефіцієнтів чутливості збігаються з графіками розподілу нормальних напружень, що діють в плоскій мембрані, що знаходиться

під тиском. Підставляючи вирази (8.3) і (8.4) відповідно в (8.1) і (8.2), отримуємо

$$\varepsilon_r = \frac{B_r r^2}{Eh^2} P; \quad (8.5)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{B_\varphi r^2}{Eh^2} P. \quad (8.6)$$

Чутливість мембранного пружного елемента

$$S'_r = \frac{\varepsilon_r}{P} = \frac{B_r r^2}{Eh^2}, \quad (8.7)$$

$$S'_\varphi = \frac{\varepsilon_\varphi}{P} = \frac{B_\varphi r^2}{Eh^2}. \quad (8.8)$$

Середні значення конструктивних коефіцієнтів чутливості в залежності від повноти використання зон деформацій можна знайти, інтегруючи рівняння (8.3) і (8.4) у відповідних межах:

$$B_{r_{cp}} = \frac{0.375(1-\mu^2) \int_0^{x/r} (1-3\frac{x^2}{r^2}) d(\frac{x}{r})}{x/r}; \quad (8.9)$$

$$B_{\varphi_{cp}} = \frac{0.375(1-\mu^2) \int_0^{x/r} (1-\frac{x^2}{r^2}) d(\frac{x}{r})}{x/r}. \quad (8.10)$$

При повному використанні зон деформації конструктивні коефіцієнти складають: 1-а зона - $R_{\varphi_{cp}} = 0,234$; 2-а зона - $B'_{r_{cp}} = 0.24$; 3-я зона - $R''_{r_{cp}} = -0.35$.

У мембранних тензорезисторних ВПТ застосовуються дровові, фольгові і напівпровідникові тензорезистори. Загальні відомості про дровяні і фольгові тензорезистори наведені в лабораторній роботі №7. Напівпровідникові тензорезистори виготовляються у вигляді одиночних наклеюваних тензорезисторів і у вигляді різних плівок.

Поодинокі напівпровідникові тензорезистори є функціональними

аналогами дротяних і фольгових тензорезисторів. В даний час випускається відносно велика кількість типів приклеюваних напівпровідникових тензорезисторів з підкладками і без підкладок, Напівпровідникові тензорезистори без підкладок (рис. 8.4) містять пластину 1, вирізану з кремнію в кристалографічному напрямку найбільшого тензорезисторного ефекту.

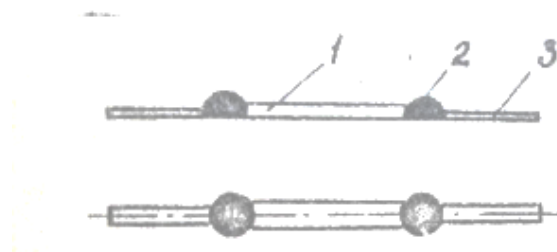


Рис. 8.4. Напівпровідниковий тензорезистор

На кінці пластини наносять контактний шар 2 і термокомпресією приєднують виводи 3, Напівпровідникові наклеювальні кремнієві тензорезистори мають базу $L = 1,4 \dots 12,4$ мм, коефіцієнт тензочутливості $K_t \approx 100 \pm 20$, номінальний електричний опір $R = 100 \dots 750$ Ом.

До переваг даних напівпровідникових тензорезисторів слід віднести високу чутливість, мініатюрність, можливість отримання високого рівня вихідного сигналу; до недоліків - складність монтажу, істотний вплив температури, пружну недосконалість, великий розкид метрологічних характеристик.

Процес виготовлення плівкових напівпровідникових тензорезисторів пов'язаний з вакуумною сублімацією тензочутливого матеріалу з подальшою конденсацією його на підкладку. Для виготовлення плівкових тензорезисторів застосовуються як металеві (наприклад, титано-алюмінієвий сплав), так і напівпровідникові (германій, кремній) матеріали. При цьому вирішується питання отримання однорідної мембрани. Надзвичайно мала маса плівкового тензоелемента дозволяє зняти обмеження, обумовлені додатковим навантаженням мембрани, яку створює клей при застосуванні наклеюваних тензорезисторів. Цей метод забезпечує з'єднання чутливого елемента - тензорезистора з мембраною фактично на молекулярному рівні і дає можливість

повисить точність і стійкість до механічних впливів.

З числа плівкових напівпровідникових структур найбільше практичне застосування отримала структура "кремній на сапфірі", або КНС-структура, що представляє собою тонку плівку монокристалічного кремнію (напівпровідника), нанесеного на поверхню пластинки з монокристалічного сапфіру (електроізолятор).

Крім КНС-структури застосовуються кремнієві структури. Ці два види структур доповнюють один одного і розвиваються паралельно.

Використання досягнень технології мікроелектроніки дозволило створити інтегральні тензомодулі, призначені для вимірювання тиску. У даних перетворювачах (рис. 8.5) пружний елемент 1 виконується методом локального контрольованого травлення з єдиного монокристала кремнію і являє собою тонку мембрану з масивними периферійним підставою. На зовнішній поверхні мембрани шляхом дифузії або іонного легування формують інтегральну тензочутливу схему 2. При застосуванні даної технології тензорезистор по суті є складовою частиною пружного елемента. Ізоляція тензорезистора від основи здійснюється за рахунок запірних властивостей р-п переходу. Крім мембран, тензомодулі можуть виготовлятися у вигляді балок, стержнів та ін. Дані елементи відрізняються практично повною відсутністю повзучості і гістерезису при нормальних і підвищених температурах. Ця цінна для вимірювальних перетворювачів механічних величин властивість пояснюється тим, що пружні елементи виконуються з монокристалів.

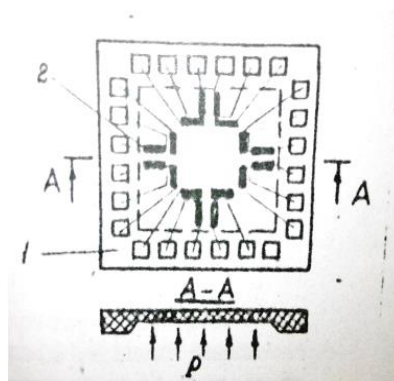


Рис. 8.5. Тензомодуль мембранного датчика тиску

Застосування методів інтегральної електроніки та локального контрольованого травлення при виготовленні чутливих елементів призводить до збільшення їх надійності, чутливості, точності, до зменшення габаритних розмірів і маси. До недоліків інтегральних тензомодулей слід віднести їх крихкість і високу чутливість до концентрації напружень.

ВПТ, що містять інтегральні тензомодулі, визначають сучасний рівень розвитку тензорезисторних ВПТ. Однак широкого практичного застосування вони поки не отримали із-за відсутності їх промислового випуску.

На основі КНС-структури був розроблений комплекс тензорезисторних ВПТ, які отримали назву "Кристал". Схема базового тензорезисторного ВПТ типу "Кристал" показана на рис. 8.6.

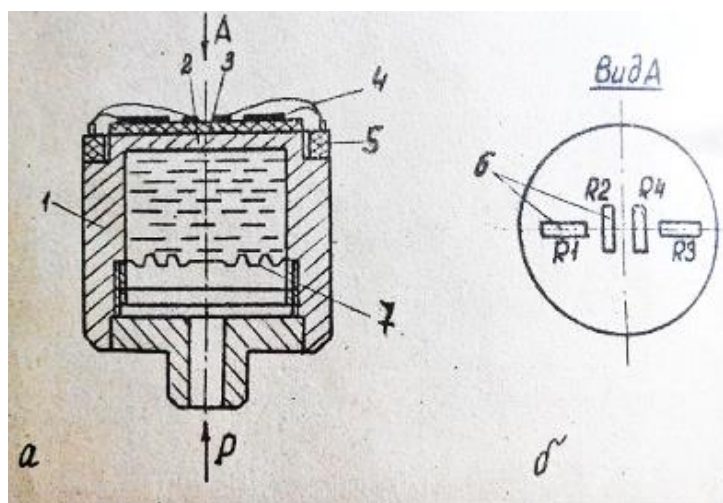


Рис. 8.6. Мембранний напівпровідниковий тензорезисторний ВПТ типу "Кристал"

ВПТ має виготовлений зі сплаву титану корпус 1. Чутливий елемент, який представляє собою мембрану 2 з припаяної срібним припоєм круглої сапфіровою платівкою 3, захищений від вимірюваного середовища за допомогою гофрованої металевої мембрани 7. Мембрана 7 виготовляється з різних корозійностійких матеріалів. Внутрішня порожнина вимірювального вузла заповнена силіконовим маслом. В окремих моделях комплексу ВПТ вимірюване середовище впливає

безпосередньо на титанову мембрану 2 чутливого елемента. У нижній частині корпусу є штуцер для підведення вимірюваного середовища до розділової мембрани. На поверхні сапфірової пластинки 3 виконані плівкові напівпровідникові тензорезистори 6, що представляють собою плечі повної мостової схеми. Тензорезистори з допомогою припаяних до них вивідних проводів 4 з'єднані з контактними елементами електроізолюючого кільця 5.

При впливі вимірюваного тиску мембрана з сапфіровою платівкою і тензорезисторами відчуває радіальні і окружні деформації. Тензорезистори розташовані і орієнтовані таким чином, щоб одна пара з них сприймала радіальні деформації, інша пара - окружні деформації. За схемою, показаної на рис. 8.6 тензорезистор R_1 і R_2 сприймають радіальну деформацію і їх опір при збільшенні тиску буде зменшуватися. Тензорезистори R_3 і R_4 сприймають окружну деформацію і їх опір при збільшенні тиску зростає.

Функція перетворення подібних тензорезисторних ВПТ може бути представлена у вигляді

$$U_{\text{вих}} = U_{\Pi} \frac{k}{(k+1)^2} \cdot \frac{n C_z K_T r^2}{h^2 E} P, \quad (8.11)$$

де $U_{\text{вих}}$ – вихідна напруга; U_{Π} – напруга живлення ВПТ;

k – коефіцієнт симетрії вимірювального ланцюга; n – кількість робочих плечей вимірювального ланцюга; C_z – еквівалентний коефіцієнт деформації; K_T – коефіцієнт тензочутливості тензорезисторів; r – радіус мембрани; h – товщина чутливого елемента; E – модуль пружності чутливого елемента.

Еквівалентний коефіцієнт деформації можна обчислити за формулою

$$C_z = \frac{C_1 B_1 + C_2 B_2 + \dots + C_n B_n}{n}, \quad (8.12)$$

де $C_1 C_2 \dots C_n$ – коефіцієнти використання деформацій;

$B_1 B_2 \dots B_n$ – максимальні конструктивні коефіцієнти чутливості; n – кількість

робочих тензорезисторов.

Коефіцієнт використання деформації показує, яка частка максимальних деформацій використовується при перетвореннях. Даний коефіцієнт може бути розрахований як відношення середнього конструктивного коефіцієнта чутливості зони до максимального значення конструктивного коефіцієнта цієї ж зони деформації:

$$C = \frac{B_{cp}}{B_{max}}. \quad (8.13)$$

З огляду на (8.13), можна відзначити, що еквівалентний коефіцієнт деформацій є середнім значенням середніх конструктивних коефіцієнтів чутливості зон деформацій, які використовуються під установку тензорезисторов:

$$C_z = \frac{B_{1cp} + B_{2cp} + \dots + B_{ncp}}{n},$$

де $B_{1cp}, B_{2cp} \dots B_{ncp}$ – середні конструктивні коефіцієнти зон деформацій пружного елемента.

Окремі питання, що стосуються вимірювальних ланцюгів тензорезисторних ВПТ, викладені в лабораторній роботі №7.

8.2. Робоча схема

Робоча схема градуировочного стенду зображена на рис. 8.7. В якості градуйованого ВПТ застосовано напівпровідниковий тензорезисторний мембранний ВПТ 2 типу "Кристал". Градування здійснюється на вантажопоршневому манометрі типу МП-600. Для реєстрації вихідного сигналу ВПТ використаний цифровий електронний вольтамперметр.

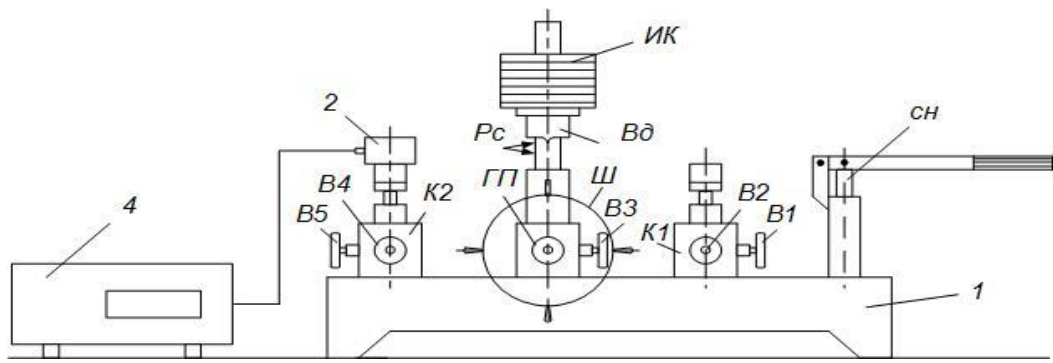


Рис. 8.7. Схема станда для градуювання

Опис конструкції і схеми ВПТ типу "Кристал" наведені в розд. 8.1. Вантажопоршневої манометр складається з вимірювальної колонки ІК, скальчатого насоса СН, призначеного для заповнення внутрішніх порожнин манометра і ВПТ робочої рідиною і створення попереднього тиску в гідросистемі, гвинтового гідравлічного преса ГП, призначеного для плавного зміни тиску в системі, двох колонок К1 і К2 для установки манометрів і ВПТ, які досліджуються, ємності для робочої рідини, запірних вентилів В1 ... В5, сполучних трубопроводів і трьох зворотних клапанів (на рис. 8.7. не показані). Призначення вентилів: В1 - відключає скальчатий насос; В2 - відключає колонку К1; В3 - відключає вимірювальну колонку; В4 - відключає колонку К2; В5 - перекриває канал скидання тиску.

При проведенні безпосередньо вимірювань поршень ІК вантажопоршневого манометра разом з розташованими на ньому вантажами повинен обертатися, а двугранна вершина B_d вантажоприймального пристрою повинна знаходитися між двома кільцевими рисками P_c , покритими червоною емаллю. Відстань між кільцевими рисками визначає робочий хід поршня. Установка поршня в межах робочого ходу досягається плавним обертанням штурвала Ш. Обертання поршня ІК проводиться вручну. Частота обертання поршня за інерцією повинна складати 30 ... 120 об/хв. При малих тисках частота обертання повинна бути більше з метою збільшення тривалості обертання за інерцією.

При установці обертового поршня ІК, вільного від вантажів, в межах його робочого ходу, в гідросистемі буде створено тиск, що дорівнює 1,0 МПа. При установці в робочому положенні поршня з вантажами тиск в гідросистемі дорівнюватиме:

$$P = (P_{r1}n_1 + P_{r2}n_2 + 10) \cdot 0,1, \text{ МПа}$$

де P_{r1} , P_{r2} - тиски, зазначені на вантажах, кгс/см²; n_1 n_2 - кількість відповідних вантажів.

8.3. Методичні вказівки по виконанню лабораторної роботи

Градуювання мембранного тензорезисторного ВПТ здійснюється зіставленням показань вольтамперметра зі значеннями тиску, що задається за допомогою вантажопоршневого манометра.

У даній лабораторній роботі ВПТ постійно встановлений на ліву колонку (К2) вантажопоршневого манометра і підключений до вольтамперметра. Тим самим лабораторне обладнання повністю підготовлено до проведення лабораторної роботи.

Починати виконання лабораторної роботи слід з прогріву вольтамперметра і всієї вимірювальної схеми, що досягається підключенням приладу до електромережі лабораторії ($U = 220\text{В}$, $f = 50\text{ Гц}$), його включенням і витримкою протягом 5 хв.

У період прогріву вимірювального ланцюга необхідно відкрити вентилі В1, В3, В4, В5 і обертанням штурвала ГП в напрямку проти руху годинникової стрілки до упору встановити плунжер ГП в початкове положення. Якщо на вантажоприймальному пристрої знаходяться вантажі, їх необхідно зняти.

Після прогріву вимірювального ланцюга і виконання всіх зазначених дій необхідно зняти показання з вольтамперметра, які відповідають нульовому надлишковому тиску в гідросистемі.

Безпосередньо градування здійснюється в такій послідовності: за

допомогою вантажопоршневого манометра встановлюється заданий тиск і після цього візуально знімаються показання з вольтметра. Задані тиску повинні бути виміряні не менше чим на семи відмітках, розташованих рівномірно по діапазону ВПТ при поступовому підвищенні тиску, і на тих же відмітках при зниженні тиску. При максимальному тиску повинна бути зроблена витримка тривалістю 5 хв, після чого відбувається зворотний хід - поступове зменшення тиску. Загальна кількість циклів вимірювань (збільшення тиску - зменшення тиску) має дорівнювати трьом.

Початкове збільшення тиску за допомогою вантажопоршневого манометра здійснюється в такій послідовності:

- закрити вентилі В2 і В5;

- відкрити вентилі В1, В3, В4;

- здійснюючи рукояткою СН коливальні рухи у вертикальній площині, заповнити внутрішні порожнини манометра і ВПТ робочою рідиною;

- помістити на вантажоприймальний пристрій поршня ІК необхідну кількість вантажів і вручну привести поршень в обертання;

- плавним обертанням штурвала ІІІ по ходу руху годинникової стрілки встановити поршень з вантажами в межах його робочого ходу.

Наступні збільшення тиску досягаються за необхідним збільшенням кількості вантажів на вантажоприймальному пристрої і установкою за допомогою штурвала ІІІ поршня, який обертають, в межах його робочого ходу.

Зменшення тиску досягається за необхідним зменшенням кількості вантажів на вантажоприймального пристрою і установкою обертанням штурвала ІІІ проти руху годинникової стрілки поршня ІК в межах його робочого ходу.

Тривалість витримки ВПТ під тиском в межах одного повного циклу навантаження і розвантаження не повинна перевищувати 20 хв. Максимальний тиск, що створюється в гідросистемі при градуюванні мембранного тензорезисторного ВПТ, визначає викладач, який проводить заняття.

Результати вимірювань доцільно представити у вигляді наступної таблиці.

Таблиця 8.1.

Р кгс/см ²	Показання приладу					
	1 – й цикл		2 – й цикл		3 – й цикл	
	Пр. хід	Зв. хід	Пр. хід	Зв. хід	Пр. хід	Зв. хід
0						
10						
...						
P _{max}						

Результати вимірювань повинні бути оброблені методом найменших квадратів і представлені у вигляді графіка в координатах "тиск – показання вимірювального приладу".

Після виконання всіх вимірювань вентилі В1, В3, В4 і В5 необхідно відкрити, вантажі з вантажоприймального пристрою зняти, вимірювальний прилад вимкнути і відключити від електромережі лабораторії.

8.4. Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

1. Мета роботи
2. Короткі відомості про мембранні тензорезисторні ВПТ.
3. Завдання
4. Робоча схема.
5. Перелік і коротка характеристика вимірювальних приладів і допоміжного обладнання, які застосовуються при виконанні роботи.
6. Результати вимірювань.

8.5. Контрольні питання

1. Поясніть принцип роботи мембранних тензорезисторних ВПТ, Наведіть їх структурні і принципові схеми.

2. Які пружні елементи застосовуються для перетворення тиску в деформації?
3. Вкажіть відмінні риси напівпровідникових тензорезисторів в порівнянні з дротяними тензорезисторами.
4. Запишіть і проаналізуйте функцію перетворення мембранного тензорезисторного ВПТ.
5. Дайте визначення конструктивного коефіцієнта чутливості і еквівалентного коефіцієнта деформації.
6. Вкажіть області застосування мембранних тензорезисторних ВПТ, їх переваги та недоліки.

Рекомендована література: [5, 14]

Лабораторна робота № 9

Дослідження температурних похибок тензорезисторних вимірювальних перетворювачів тиску

Мета лабораторної роботи:

ознайомитися з методами аналізу і корекції температурних похибок тензорезисторних перетворювачів тиску;

набути навичок визначення температурних похибок тензорезисторних ВПТ;

освоїти методику градуювання тензорезисторних ВПТ за допомогою калібрувальних опорів.

9.1. Загальні відомості про температурні похибки тензорезисторних ВПТ і методи їх корекції

При проектуванні тензорезисторних вимірювальних перетворювачів механічних величин в якості вимірювальних ланцюгів найчастіше застосовуються дільники напруги і мостові схеми. З точки зору підвищення метрологічних і експлуатаційних характеристик тензорезисторних перетворювачів (чутливість, лінійність, температурна стабільність, споживана енергія) кращі мостові ланцюги з чотирма рівними робочими плечима, опори яких в суміжних плечах відчують деформації різних знаків.

Схема такого мостового ланцюга, що є основою ланцюгів більшості датчиків тиску, зображена на рис. 9.1, а. Тут тензорезистори R_2, R_3 відчують поздовжні відносні деформації стиску ε , а R_1, R_4 - поперечні деформації розтягу $\mu\varepsilon$ (див. рис. 7.7.):

$$\left. \begin{aligned} R_1, R_4 &= R_0 (1 + K_T \mu\varepsilon); \\ R_2, R_3 &= R_0 (1 - K_T \varepsilon). \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

$$\varepsilon = \frac{S_{\text{эф}}}{S_{CT} E} P; \quad \varepsilon_R = 2(1 + \mu) K_T \varepsilon; \quad (9.2)$$

$$U_{\text{вих}} = U_{\Pi} \frac{k}{(k+1)^2} \cdot 2(1 + \mu) K_T, \quad (9.3)$$

де $U_{\text{вих}}$ – номінальна вихідна напруга; U_{Π} – напруга живлення; R_0 – номінальний опір тензодатчиків; K_T – коефіцієнт тензочутливості; ε – поздовжня відносна деформація стрижня; $K = \frac{R_1 R_4}{R_2 R_3} = 1$ – коефіцієнт симетрії моста; E, μ – відповідно модуль пружності і коефіцієнт Пуассона матеріалу стрижня; $S_{\text{эф}}$ – ефективна площа мембрани; S_{CT} – площа поперечного перерізу стрижня; P – вимірювальний тиск; ε_R – відносна сумарна зміна опорів плечей моста [14].

Параметри виразу (9.3) залежать від температури. Так, якщо температура змінюється на ΔT , то $K_T = K_{T_0}(1 + \theta \Delta T)$, $E = E_0(1 + \alpha_E \Delta T)$, $R = R_0(1 + \alpha_0 \Delta T)$ і в результаті вирази (9.1) - (9.3) приймають вид

$$\left. \begin{aligned} R_{1,4} &= R_0 \left(1 + K_T \varepsilon \mu \frac{1 + \alpha_E \Delta T}{1 + \theta \Delta T} + \alpha_{1,4} \Delta T \right); \\ R_{2,3} &= R_0 \left(1 - K_T \varepsilon \mu \frac{1 + \alpha_E \Delta T}{1 + \theta \Delta T} + \alpha_{2,3} \Delta T \right); \end{aligned} \right\} ; \quad (9.4)$$

$$\alpha = \alpha_0 + K_T (\beta_c - \beta_T);$$

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вих},H} \left[\frac{1 + \alpha_E \Delta T}{(1 + \alpha \Delta T) \left(1 + \frac{\alpha}{k+1} \Delta T \right) (1 + \theta \Delta T)} + \frac{(\alpha_1 + \alpha_4 - \alpha_2 - \alpha_3) \Delta T + (\alpha_1 \alpha_4 - \alpha_2 \alpha_3) \Delta T^2}{\varepsilon_R} \right], \quad (9.5)$$

де $U_{\text{вих},H}$ – номінальна вихідна напруга; K_{T_0}, E_0 – значення K_T і E при $T = T_0$; $\Delta T = T - T_0$ – зміна температури що до T_0 ; θ – температурний коефіцієнт тензочутливості; α_E – температурний коефіцієнт модуля пружності матеріалу

стержня; α – температурний коефіцієнт опору матеріалу тензорезистора; α_i – сумарний температурний коефіцієнт опору i -го плеча моста; β_c, β_T – коефіцієнт лінійного розширення відповідно стержня та тензорезистора.

Перетворивши (9.5), отримаємо вираз, зручний для аналізу температурних похибок тензорезисторних ВПТ:

$$U_{\text{ввлх}} = U_{\text{ввлх.Н}} \left[F(A) + \frac{1}{\varepsilon_R} F(B) \right], \quad (9.6)$$

$$F(A) = 1 + A_1 \Delta T + A_2 \Delta T^2;$$

$$F(B) = B_1 \Delta T + B_2 \Delta T^2;$$

$$A_1 = \alpha_E - \theta - \frac{k+2}{k+1} \alpha; \quad B_1 = \alpha_1 + \alpha_4 - \alpha_2 - \alpha_3;$$

$$A_2 = -\alpha_E \left(\theta + \frac{k+2}{k+1} \alpha \right) - \frac{\alpha^2 + (k+2)\alpha\theta}{k+1};$$

$$B_2 = \alpha_1 \alpha_4 - \alpha_2 \alpha_3. \quad (9.7)$$

Перший член виразу (9.6) являє собою мультиплікативну складову похибки ВПТ (тобто похибка чутливості), другий - аддитивну (похибка "зсуву" нуля). Для оцінки числових значень похибок використовуємо наступні значення коефіцієнтів [4]: $R_0 = 700 \text{ Ом}$; $k = 1$; $\theta = 0,25 \cdot 10^3 \text{ K}^{-1}$; $\alpha_0 = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\alpha_1 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\alpha_2 = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\alpha_3 = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\alpha_4 = 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\Delta T = 50 \text{ K}$; $\varepsilon_R = 6 \cdot 10^{-3}$.

Отримаємо

$$A_1 \Delta T + A_2 \Delta T^2 = -0,16(\% \text{ K}^{-1}) 50 \text{ K} - 1,6 \cdot 10^{-4} (\% \text{ K}^{-2}) \cdot 2500 \text{ K}^2 = 8,4\%;$$

$$\frac{1}{\varepsilon_R} (B_1 \Delta T + B_2 \Delta T^2) = -0,33(\% \text{ K}^{-1}) 50 \text{ K} - 3,3 \cdot 10^{-4} (\% \text{ K}^{-2}) \cdot 2500 \text{ K} = 11,3\%.$$

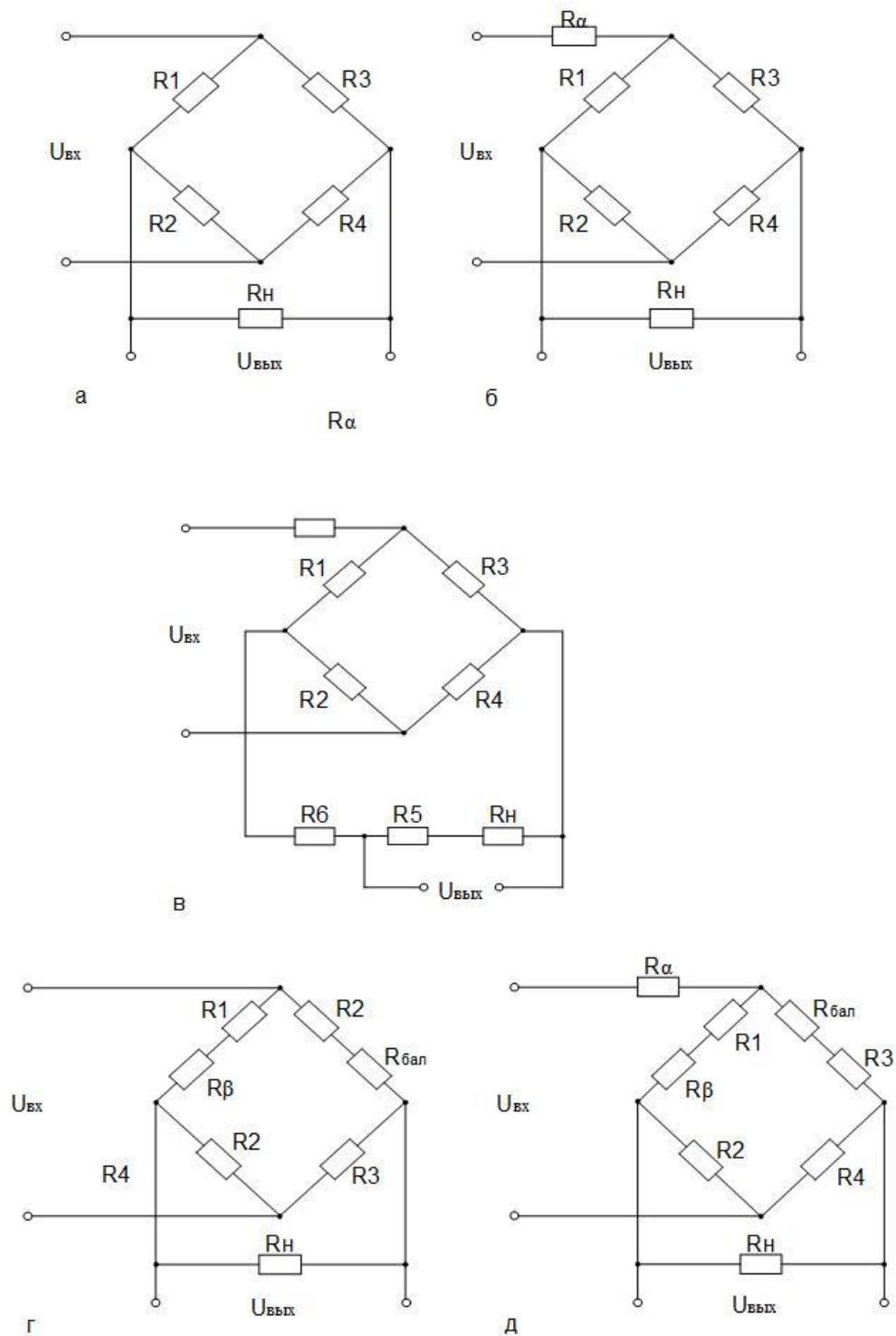


Рис. 9.1. Вимірювальні мостові схеми

Таким чином, для забезпечення високих метрологічних характеристик необхідно коректувати температурні похибки. При цьому необов'язково домагатися незалежності від температури кожного з параметрів формули (9.3). Досить ввести в вимірювальний ланцюг додаткові елементи з такими

температурними характеристиками, які забезпечують корекцію мультиплікативної та адитивної складових похибки або їх значне зменшення. Для корекції температурних похибок найбільш поширені методи, засновані на включенні додаткових термозалежних або пасивних опорів в плечі, вимірювальну діагональ або ланцюг живлення мостового вимірювального ланцюга. Більш високого ступеня корекції температурних похибок можна досягти застосуванням в схемах напівпровідникових коригуючих термисторів, побудовою тензорезисторних схем з активними (підсилювальними) елементами, створенням додаткових інформаційних каналів в вимірювальних ланцюгах, використанням принципів комбінованого управління і ін. [4].

Розглянемо окремо методи корекції мультиплікативної та адитивної складових температурних похибок ВПТ.

Найбільш простий варіант корекції мультиплікативної похибки зводиться до послідовного включення з мостовою схемою резистора R_α (рис. 9.1, б), температурна характеристика якого $R_\alpha = R_{\alpha 0}(1 + \lambda \Delta T)$, де λ - температурний коефіцієнт опору (ТКО) матеріалу опору R_α . В результаті вираз (9.6) приймає вигляд

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих.Н}}}{1 + \xi} (1 + A_1 \Delta T + A_2 \Delta T^2 - \frac{\xi \lambda \Delta T}{\xi + 1}); \quad (9.8)$$

$$\xi = \frac{R_{\alpha 0}}{R_0}.$$

Розрахунок схеми термокомпенсації зводиться до визначення номінальних значень опорів, виконаних з матеріалу з ТКО λ , які забезпечують мінімізацію виразу в дужках формули (9.8). Основний варіант розрахунку передбачає компенсацію найбільш значної лінійної складової похибки. Для цього необхідно визначити

$$A_1 = \frac{\xi \lambda}{\xi + 1}, \quad (9.9)$$

звідки

$$R_{\alpha 0} = R_0 \xi = R_0 \frac{A_1}{\lambda - A_1}. \quad (9.10)$$

З виразу (9.8) випливає, що введення в вимірювальний ланцюг компенсаційного опору призводить до зниження чутливості в $(1 + \xi)$ раз. Тому при виборі λ необхідно прагнути до забезпечення мінімального ξ . Компенсація лінійної складової можлива і ефективна, якщо знаки A_1 і λ співпадають і $|\lambda| > |A_1|$.

Температурна мультипликативна похибка ВПТ в цьому випадку буде визначатися квадратичною складовою. Якщо $A_2 \Delta T^2 < \delta_{\text{дон}}$, де $\delta_{\text{дон}}$ – допустима приведена похибка датчика, то компенсація квадратичної складової не проводиться. Наприклад, для даних $R_0 = 700$ Ом; $k = 1$; $A_1 = 0,16\% K^{-1}$ $A_2 = 1,6 \cdot 10^{-4}\% K^{-2}$ включення в діагональ живлення мідного опору з $(\lambda = 0,4\% K^{-1})$ $R_{\alpha} = 525$ Ом приводить до зниження мультипликативної похибки в діапазоні $\Delta T = 50$ К з 8,4 до 0,4%. При цьому чутливість знижується в 1,75 раза. При необхідності корекції перших трьох членів розкладання мультипликативної похибки в ряд (9.6), в мостовий ланцюг вводять додатково кілька опорів, як зображено на рис. 9.1, в, і вибирають співвідношення опорів таким чином, щоб чутливість ВПТ не залежала від температури.

Компенсація похибок, що мають адитивний характер, проводиться введенням компенсаційного опору $R_{\beta} = R_{\beta 0} (1 + \beta \Delta T)$ в одне з плечей моста (рис. 9.1, г). При цьому функція $F(B)$ приймає вид

$$F'(B) = B_1 \Delta T + B_2 \Delta T^2 - \frac{1}{\varepsilon_R} \rho \beta \Delta T, \quad (9.11)$$

де

$$\rho = \frac{R_{\beta_0}}{R_0}.$$

Для компенсації основної частини адитивної похибки - лінійної складової - необхідно виконати умову $B_1 + \frac{1}{\varepsilon_R} \rho \beta = 0$,

звідки

$$R_{\beta_0} = \rho \cdot R_0 = R_0 \frac{B_1 \varepsilon_R}{\beta}. \quad (9.12)$$

Аддитивна температурна похибка схеми з R_{β} буде визначатися квадратичною складовою $\frac{1}{\varepsilon_R} B_2 \Delta T^2$.

Наприклад, для схеми $R_0 = 700$ Ом; $k = 1$; $\varepsilon_R = 6 \cdot 10^{-3}$, $B_1 = -\varepsilon_R \cdot 0,33\% K^{-1}$, $B_2 = -\varepsilon_R \cdot 3,3 \cdot 10^{-4} \% K^{-2}$ введення в одне з плечей мідного опору ($\beta = 0,4\% K^{-1}$), $R_{\beta} = 3,5$ Ом призводить до зниження адитивної похибки в інтервалі $\Delta T = 50 K$ с 17,3 до 0,8%. Введення в одне з плечей коригуючого опору R_{β} викликає розбаланс моста, тому для балансування реальні вимірювальні ланцюги доповнюються балансувальними опорами $R_{\beta_{ал}}$ (рис. 9.1, д). Незважаючи на наявність балансувальних опорів перед кожним виміром необхідно здійснювати точне додаткове балансування зовнішніми підсилювально-перетворюючими пристроями. При застосуванні схеми, зображеної на рис. 9.2. нульового вихідного сигналу домагаються зміною опорів R_{H1} і R_{H2} . При розбалансі моста в результаті виникнення адитивних температурних похибок досягають збільшення одного і зменшення іншого опорів R_{H1} і R_{H2} на Δ .

При цьому приведену адитивну похибку слід визначати за формулою (9.13)

$$\gamma_{\Delta T} = \frac{2R_0\Delta}{\varepsilon_R R_{H1}^2} \cdot 100\%, \quad (9.13)$$

де $\gamma_{\Delta T}$ - відносна приведена похибка; $\varepsilon_R = 6 \cdot 10^{-3}$; $R_0 = 700 \text{ Ом}$; R_H і Δ - відповідно балансувальний опір і його зміна.

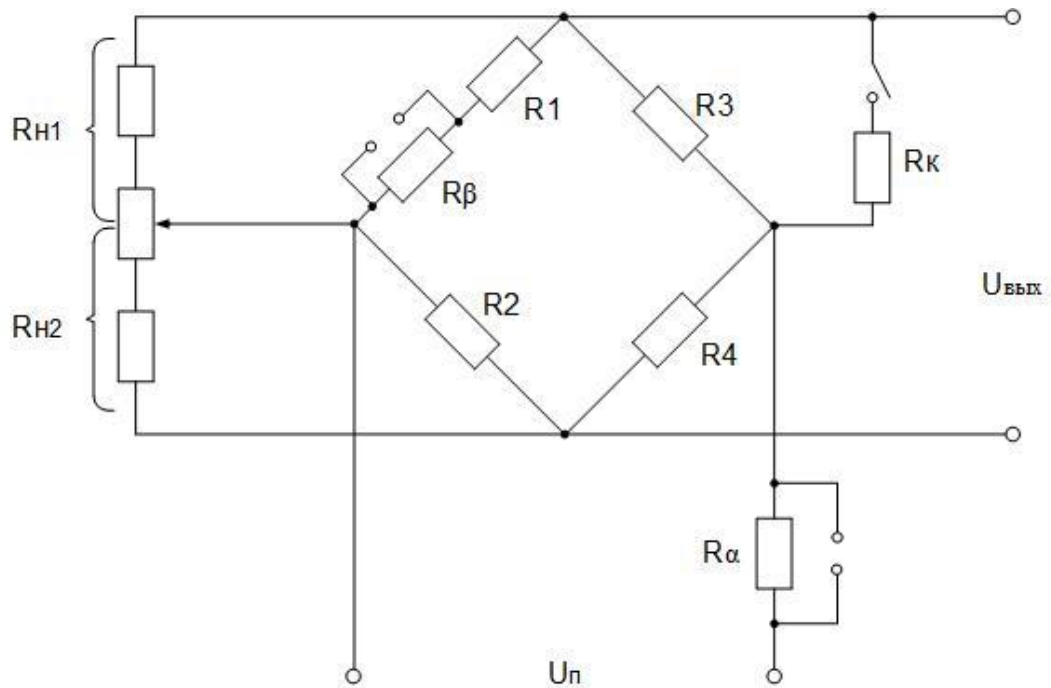


Рис. 9.2. Вимірювальна схема для дослідження температурних похибок ВПТ

При підключенні каліброваного опору паралельно одному з плеч моста опором R_0 в вихідний ланцюг ВПТ виникає сигнал, відповідний деформації

стержня датчика, що викликає відносну зміну опорів плечей моста $\varepsilon_{Ri} = \frac{R_0}{R_{ki}}$.

Змінюючи опір R_{ki} , можна здійснити калібрування вимірювальної ланцюга тензорезисторних датчиків.

9.2. Робоча схема

Принципова схема установки для дослідження температурних похибок тензорезисторних ВПТ зображена на рис. 9.3. До складу установки входять термостат 1, вимірювальна схема 2, підсилювач постійного струму 3, цифровий вольтметр 4 типу Щ4310, вимірювач температури 5, трансформатор 6, досліджуваний тензорезисторний ВПТ 7 типу ЛХ-4І2.

9.3. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи

1. Включити в мережу вимірювальні електронні прилади і підсилювач вихідного сигналу тензодатчика. Прогріти прилади протягом 5 хвилин.
2. Переключити універсальний вольтметр в режим "калібрування" і встановити нуль приладу і номінальну чутливість.
3. Збалансувати мостову схему обертанням ручок декадних перемикачів МО-61-1, Значення R_{H1} і R_{H2} прийняти за початок відлік значень Δ .
4. Встановити на магазині опорів МС значення R_K . Підключити калібрований опір паралельно R . Зняти виміри з універсального вольтметра. Дані занести в табл. 9.1.
5. Зняти виміри U_i з універсального вольтметра при підключенні паралельно R значень $R_{Ki} = (1,33;2;4)R_K$. Данні занести в табл. 9.1.
6. Зашунтувати скобою компенсаційний опір R_α . Виконувати пп.3-5.
7. Зашунтувати скобою компенсаційний опір R_β . Виконувати пп.3-5.
8. Зашунтувати скобами компенсаційні опори R_α и R_β . Виконувати пп.3-5.

9. Включити електричне живлення термостата. Регулюючи за допомогою трансформатора напругу живлення термостата, встановити температуру в термостаті на (25 ± 1) К вище температури T_A в лабораторії. Витримати ВПТ при $\Delta T = 25$ К протягом 5...10 хв.

10. Виконати пп.3-8. Отримані результати U_i і Δ_i занести в табл. 9.1.

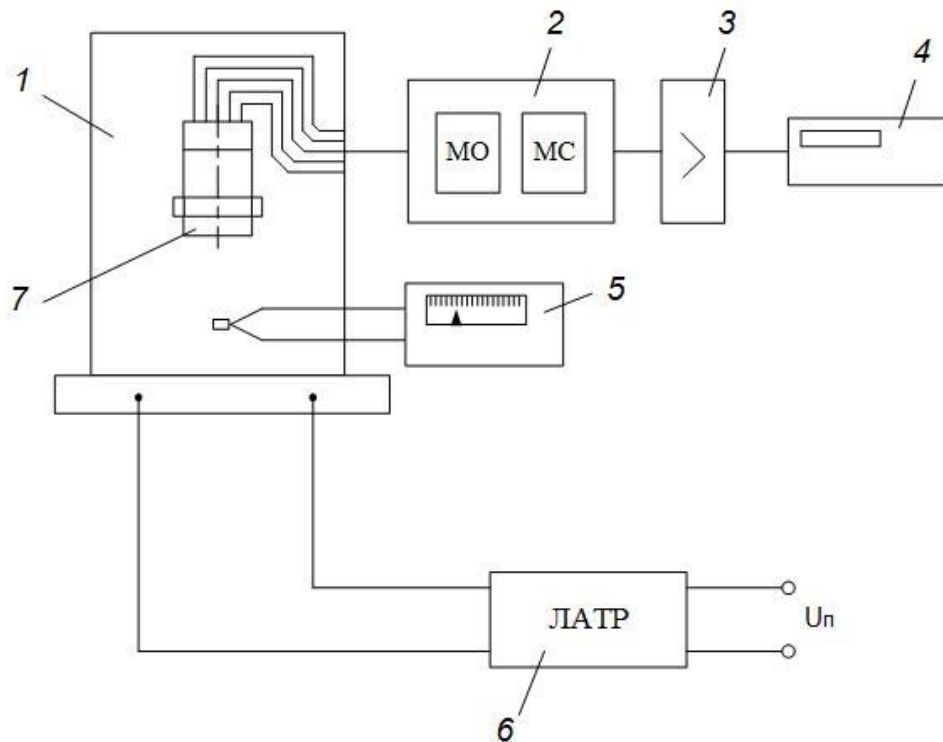


Рис. 9.3. Схема установки для дослідження температурних похибок тензорезисторних ВПТ

11. Встановити послідовно в термостаті $\Delta T = 50$ К; 75 К; Витримати ВПТ на протязі 7 хвилин при вказаних ΔT . Виконати пп.3-8. Отримані результати U_i і Δ_i занести в табл. 9.1.

12. Вимкнути і відключити вимірювальні прилади, підсилювач та термостат від електромережі.

де ε_{Ri} - відносна зміна опору R_3 при підключенні R_{Ki} ; R_3 - опір 3-го плеча моста;

R_{Ki} - підключений калібрувальний опір. Отримані результати занести в табл. 9.1.

13. Розрахувати значення адитивних температурних похибок за формулою (9.13) при $\Delta T = (25; 50; 75)$ для чотирьох різновидів вимірювальних ланцюгів.

Таблиця 9.1

Результати визначення температурних похибок ВПТ

ΔT К	Схема	Δ Ом	Значення U_i				Адитив на похибка , %	Чутли- вість	Мульти- плікатив на похибка, %
			$R_k =$	$4/3 R_k =$	$2R_k =$	$4R_k =$			
			$\varepsilon_{R4} = 6 \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon_{R3} =$	$\varepsilon_{R2} =$	$\varepsilon_{R1} =$			
0 $T = T_A$	1	0					0		0
	2	0					0		0
	3	0					0		0
	4	0					0		0
25	1								
	2								
	3								
	4								
50	1								
	2								
	3								
	4								
75	1								
	2								
	3								
	4								

*) 1- $R_\alpha \neq 0$; $R_\beta \neq 0$; 2- $R_\alpha = 0$; $R_\beta \neq 0$; 3- $R_\alpha \neq 0$; $R_\beta = 0$; 4- $R_\alpha = 0$; $R_\beta = 0$.

14. Розрахувати значення чутливості ВПТ і ε_R при $\Delta T = (25; 50; 75)$ для чотирьох різновидів вимірювальних ланцюгів за формулою

$$S'_{\Delta T} = \frac{\sum_{i=1}^4 V_i \varepsilon_{Ri}}{\sum_{i=1}^4 \varepsilon_{Ri}}, \quad (9.14)$$

де $S'_{\Delta T}$ – чутливість при $T = T_A + \Delta T$; V_i – вихідний сигнал ВПТ (після підсилювача) при впливі ε_{Ri} .

15. Розрахувати значення мультиплікативних температурних похибок для $\Delta T = (25; 50; 75)$:

$$\delta_{\Delta T} = \frac{S'_{\Delta T} - S'_0}{S'_0} \cdot 100\%, \quad (9.15)$$

де $S'_{\Delta T}$ – чутливість при $T = T_A + \Delta T$; S'_0 – чутливість при $\Delta T = 0$.

16. Отримані в пп.15,16 результати занести в табл. 9.1. Побудувати графіки залежностей $\gamma_{\Delta T} = \gamma(\Delta T)$, $\delta_{\Delta T} = \delta(\Delta T)$ для чотирьох різновидів вимірювальних ланцюгів.

9.4 Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

1. Мета роботи.
2. Короткі відомості про температурні похибки тензорезисторних ВПТ і методах їх корекції.
3. Схема лабораторної установки.
4. Результати вимірювань -таблиця 9.1; розрахунки та графіки $\gamma_{\Delta T} = \gamma(\Delta T)$, $\delta_{\Delta T} = \delta(\Delta T)$.

9.5. Контрольні питання

1. Вкажіть причини виникнення адитивних температурних похибок тензорезисторних ВПТ і методи їх компенсації.
2. Вкажіть причини виникнення мультиплікативний температурних похибок тензорезисторних ВПТ і методи їх компенсації.
3. Наведіть вимоги до параметрів і матеріалів компенсаційних опорів R_α і R_β .
4. Чи можна здійснити корекцію температурних похибок тензорезисторних ВПТ за допомогою пасивних компенсаційних опорів або опорів, що мають температурний коефіцієнт опору (ТКО) різного знака зі значеннями A_I і B_I .

Рекомендована література: [4, 14]

Лабораторна робота № 10

Градування електричного компенсаційного манометра

за допомогою автоматичного задавача тиску

Мета лабораторної роботи:

ознайомитися з принципом дії і устроєм компенсаційних манометрів з електричним вихідним сигналом;

набути навичок градування засобів вимірювання тиску за допомогою автоматичного задавача тиску;

набути навичок обробки результатів градування засобів вимірювання тиску.

10.1. Загальні відомості про електричні компенсаційні манометри і автоматичні задавачі тиску

Для роботи в автоматичних і автоматизованих системах контролю, вимірювання, регулювання та управління технологічними процесами з метою видачі інформації у вигляді уніфікованого електричного (токового) сигналу про вимірюваний тиск в рамках Державної системи приладів (ДСП) розроблений ряд вимірювальних перетворювачів тиску (ВПТ), побудованих за компенсаційною схемою. Приладобудівні підприємства випускають вимірювальні перетворювачі даного типу для вимірювання абсолютного, надлишкового та вакуумметричного тиску газу - тягоміри, напороміри, манометри абсолютного тиску; газу і рідини - манометри, вакуумметри, мановакуумметри.

В якості пружних чутливих елементів (ЧЕ) в компенсаційних ВПТ застосовуються сильфони (тип ВПТ - НС, Ш, ВС, ШС, ТС, ТІС, МАС), трубки Бурдона (МП) і трубки Нагаткіна (МСВ). Матеріали, ЧЕ для ВПТ типу МСВ - 50ХВА, для інших типів - 36НХТЮ і 12Х18Н10Т.

Основні характеристики приладів даної групи

Верхня межа вимірювання, Па.....від 200 до 10^9 .

Межі основної похибки, %..... $\pm 0,6$; $\pm 1,0$; $\pm 1,5$.

Вихідний уніфікований струмовий сигнал:

0...5 мА при опорі навантаження до 2600 Ом;

0...20 мА при опорі навантаження до 1000 Ом;

Діапазон температур навколишнього повітря від -50 до $+50^{\circ}\text{C}$, відносна вологість ...не більше 95% (при $T \pm 35^{\circ}\text{C}$).

Живлення - від мережі змінного струму, напруга 220_{-33}^{+22}В , частота (50 ± 1) Гц.

Споживана потужність ... не більше $15\text{ В} \cdot \text{А}$

Принцип дії електричних компенсаційних ВПТ заснований на зрівноважуванні механічних зусиль, що розвиваються ЧЕ під дією вимірюваного тиску, зусиллям, створюваним магнітоелектричним зворотним перетворювачем. Звідси інша назва приладів даного типу - прилади з силовою компенсацією.

Розглянемо принципову схему електричного компенсаційного манометра системи ГСП, в якому в якості ЧЕ застосований сильфон (рис.10.1). Переміщення системи взаємопов'язаних важелів (2 - Т-подібний важіль, 6 - Г-подібний важіль, 9-важіль) здійснюється під дією наступних сил (F):

1) розвиваються сильфоном під дією вимірюваного тиску: $F_c = PS_{\text{эф}}$ де F_c - сила, що розвивається сильфоном; P – вимірювальний тиск; $S_{\text{эф}}$ - ефективна площа сильфона;

2) розвиваються магнітоелектричним зворотним перетворювачем 11: $F_{\text{гс}} = K_{\text{с}} \cdot I$ де $F_{\text{гс}}$ - сила, що розвивається зворотним перетворювачем; $K_{\text{с}}$ - чутливість зворотного перетворювача; I - сила струму в обмотці зворотного перетворювача;

3) пружних сил сильфона 1: $\Delta F_c = C_c \cdot \lambda$, де ΔF_c - діючі сили; C_c - жорсткість сильфона, λ - переміщення вільного кінця сильфона;

4) пружних сил пружини 4: $\Delta F_{np} = C_{np} \cdot \lambda_A$, де ΔF_{np} - діючі сили, C_{np} - жорсткість пружини; λ_A - переміщення точки A кріплення пружини.

Надалі пружні сили сильфона 1 і пружини 4 враховуватимемо одним узагальненим коефіцієнтом жорсткості

$$C = C_c + \frac{l_g}{l_1} C_{np}.$$

Пружина 4 призначена для установки нульового показання на вторичному вимірювальному приладу при відсутності вимірюваного тиску.

Під дією вимірюваного тиску виникає сила F_c , що створює переміщення системи важелів 2,6,9. Це призводить до переміщення сердечника 7 диференційно-трансформаторного перетворювача (ДТП), закріпленого на важелі 9. У вторинній обмотці ДТП виникає змінна напруга, амплітуда якого пропорційна переміщенню сердечника h . Змінна електрична напруга і амплітуди надходить на вхід електронного підсилювача УП-20. Електронний підсилювач складається з попереднього підсилювача напруги, фазочувствительного випрямляча, коригувальних ланцюгів і підсилювача постійного струму. Електричний сигнал в УП-20 посилюється по напрузі і потужності і перетворюється в сигнал постійного струму. Вихідний сигнал постійного струму УП-20 є вихідним сигналом компенсаційного вимірювального перетворювача тиску.

Цей сигнал надходить в обмотку магнітоелектричного зворотного перетворювача 2, який створює силу, пропорційну силі струму вихідного сигналу. Під дією цієї сили рухома система важелів врівноважується.

Переміщений упор 3 служить для зміни довжини плечей l_2 і l_3 . Це дозволяє регулювати верхню границю вимірювання ВПТ. Завдяки силовій компенсації переміщення пружних ЧЕ незначні в порівнянні з приладами некомпенсаційного типу.

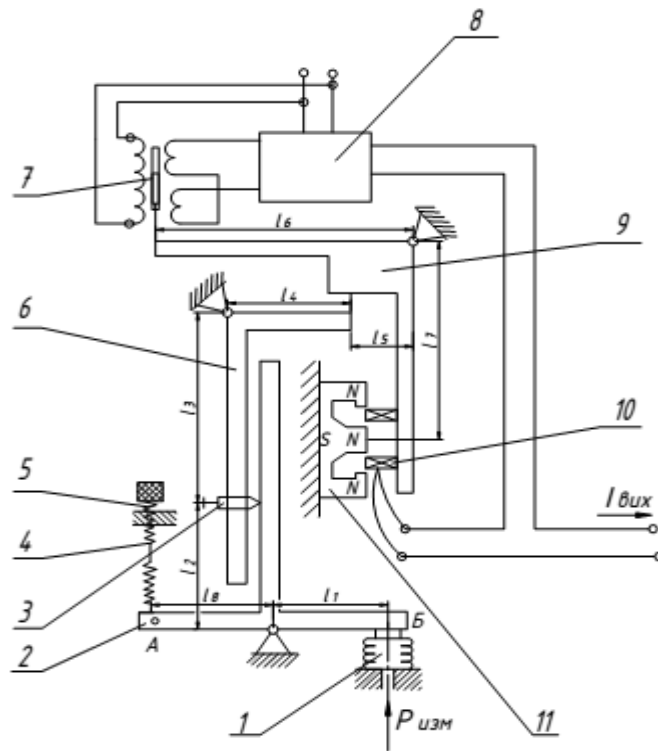


Рис. 10.1. Електричний компенсаційний манометр

1- сильфон; 2 – Т- подібний важіль; 3 – переміщуваний упор; 4 - пружина; 5 - винт; 6 - Г- подібний важіль; 7 - сердечник ДТП; 8 - підсилювач УП-20; 9 - важіль; 10 - котушка магнітоелектричного перетворювача; 11 – зворотній перетворювач.

Це призводить до виключення таких похибок ЧЕ, як зміна ефективної площі і жорсткості сильфона (тобто похибок, обумовлених нелінійністю характеристики ЧЕ [1]. Наявність зворотного зв'язку також зменшує вплив на точність ВПТ похибок ланок, охоплених зворотнім зв'язком, тобто похибок ДТП і підсилювача [3].

Структурна схема електричного компенсаційного манометра наведена на рисунку 10.2.

В якості еталонних і зразкових засобів задання тиску під час градування і повірки вимірювальних перетворювачів найбільш широко застосовуються вантажопоршневі прилади [5, 10]. В останні роки одним з напрямків робіт в

створенні повірочних вантажопоршневих засобів є їх автоматизація, зокрема автоматизація накладення вантажів.

Серед автоматизованих пристроїв цієї групи найбільший інтерес представляють автоматичні задавачі тиску АЗТ 0,4 ... 4.

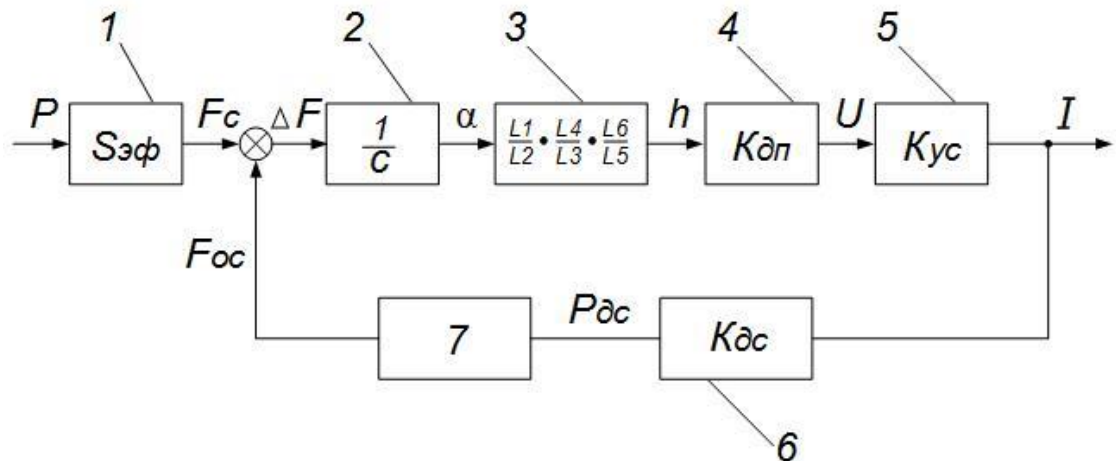


Рис. 10.2. Структурна схема електричного компенсаційного манометра:

1 - сильфон; 2,3,7 - рухома система перетворювача; 4 - ДТП; 5 - підсилювач; 6 - датчик сили (електромагнітний зворотній перетворювач)

Автоматичні задавачі тиску типу АЗТ являють собою автоматизовані вантажопоршневі манометрів з фотоелектричним управлінням, подача і скидання тиску в яких здійснюється за допомогою електромагнітних клапанів. Принципова схема АЗТ4Т10 показана на рис. 10.3, Основні вузли АЗТ: поршнева пара 8, вантажоприймальний пристрій 9, що представляє собою ступінчасту втулку, насаджену на поршень, і корпус 7, на якому розташовуються вантажі 6, які не беруть участь в даний момент в створенні навантаження. Під поршневою камерою розташована розділова емність 13. Рівень робочої рідини в емності вище краю циліндра, що виключає можливість попадання повітря під поршень. Повітря в верхню частину емності 13 і до приладів надходить від мережі пневможивлення через клапани тиску 2 (КД) або 1 (КДБ - швидкий хід). Скидання повітря в атмосферу при зворотному ході

задавача здійснюється через клапани 10 (КС) або 11 (КСБ - швидкий хід), Швидкість наростання і скидання тиску регулюється дроселями 12.

Роботою електромагнітних клапанів керують з блоку управління 4 АЗТ за допомогою клавіш "вгору", "вниз", "швидко". Задавач має можливість працювати в трьох режимах.

1. Ручний режим. Завдання кожного чергового значення тиску здійснюється після команди оператора (натискання на клавішу).

Для роботи в ручному режимі необхідно:

включити тумблер МЕРЕЖА;

встановити тумблер на пульті управління в положення РУЧНИЙ;

різко натиснути (швидко забираючи палець) клавішу "вище".

При цьому відкривається клапан КД і під дією тиску пневможивлення у верхній частині ємності 13 збільшується тиск, який надходить до приладів, які досліджуються. Підвищення тиску припиняється при піднятті поршнем чергового вантажу в момент врівноваження вимірювальної колонки АЗТ. Останній контролюється за допомогою фотоелектричного перетворювача 5. На пульті блоку управління загоряється лампочка "Тиск задано".

Для зменшення створюваного тиску на один інтервал дискретності необхідно різко натиснути клавішу "нижче". При цьому відкривається клапан КС і тиск, що впливає на досліджувані прилади, скидається в атмосферу. Втулка з вантажами опускається і верхній вантаж розвантажує вимірювальну колонку. Скидання тиску припиняється за сигналом фотоелектричного датчика при врівноваженні колонки. На пульті блоку управління загоряється лампочка "Тиск задано".

Витримка на кожному ступені тиску на розсуд оператора.

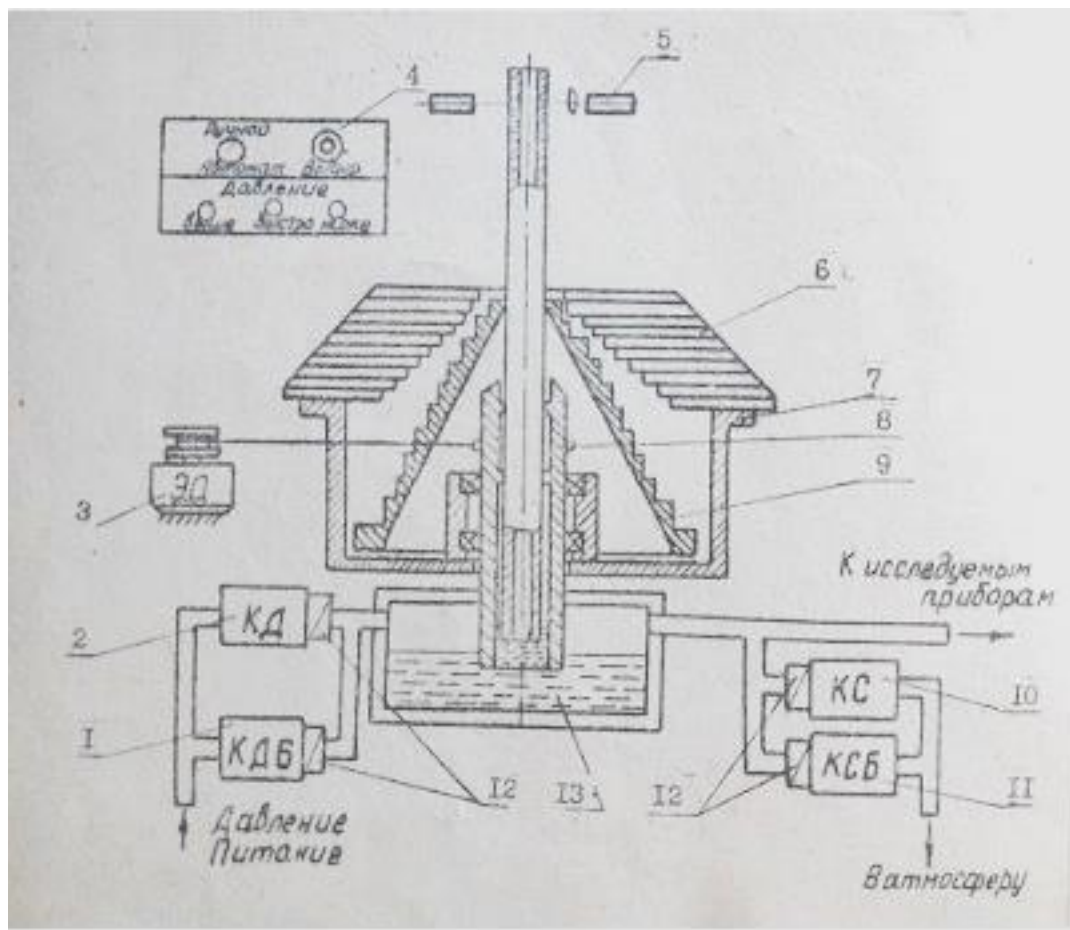


Рис. 10.3. Принципова схема АЗТ

2. Напіваавтоматичний режим. Команда подається оператором напочатку прямого і зворотного ходу. Для роботи в напіваавтоматичному режимі необхідно:

встановити тумблер на пульті управління в положення АВТОМАТ; натиснути клавішу "вище"; тиск почне наростати, будуть послідовно задаватися дискретні значення тиску;

коли загоряється лампа "верхня межа", натиснути клавішу "нижче" тиск почне падати і здійснюється зворотний хід АЗТ.

Витримка на кожному ступені тиску задається автоматично в залежності від положення потенціометра на пульті управління АЗТ.

3. Автоматичний режим. Команда подається напочатку прямого ходу. Витримка на кожному ступені і на верхній межі тиску задається автоматично.

Пристрій навантаження АЗТ дозволяє отримувати дискретні значення

навантажувального зусилля, причому крок навантаження постійний і дорівнює вазі одного вантажу. Верхня границя тисків, які задаються визначається загальною вагою комплексу вантажів. Для АЗТ 4Т10 максимальний тиск становить $4 \cdot 10^5$ Па, максимальна кількість ступенів дорівнює 10.

Клас точності задавача становить 0,02.

Для усунення сухого тертя в поршневій парі циліндр приводиться в обертання за допомогою електродвигуна 3.

Для підвищення або скидання тиску без зупинки на проміжних щаблях в АЗТ передбачений режим "швидкого ходу". Для здійснення швидкого ходу необхідно:

Натиснути одночасно клавіші "швидко" і "вище" і не відпускати, поки не загориться лампочка "верхня межа";

Натиснути одночасно клавіші "швидко" і "нижче" і не відпускати до повного падіння тиску.

Джерела живлення АЗТ:

стиснене повітря тиском $2P_H$ (контролюється манометром на пульті управління), де P_H верхня границя тисків, які задаються;

змінний електричний струм 220 В, 50 Гц.

10.2. Робоча схема

Схема з'єднання приладів зображена на рис. 10.4.

Для завдання і точного визначення тисків при градуванні компенсаційного ВПТ застосовується АЗТ-4Т10. Діапазон вимірюваних тисків МС-І ($0 \dots 10^5$) Па. При виконанні лабораторної роботи АЗТ застосовується з комплектом 10 вантажів, кожен з яких при навантаженні створює тиск у вихідній магістралі задавача, рівний $0,1 \cdot 10^5$ Па. Пневможивлення АЗТ здійснюється з рессивера 1. Для вимірювання вихідних сигналів ВПТ застосовується цифровий міліампервольтметр ВК-2-20.

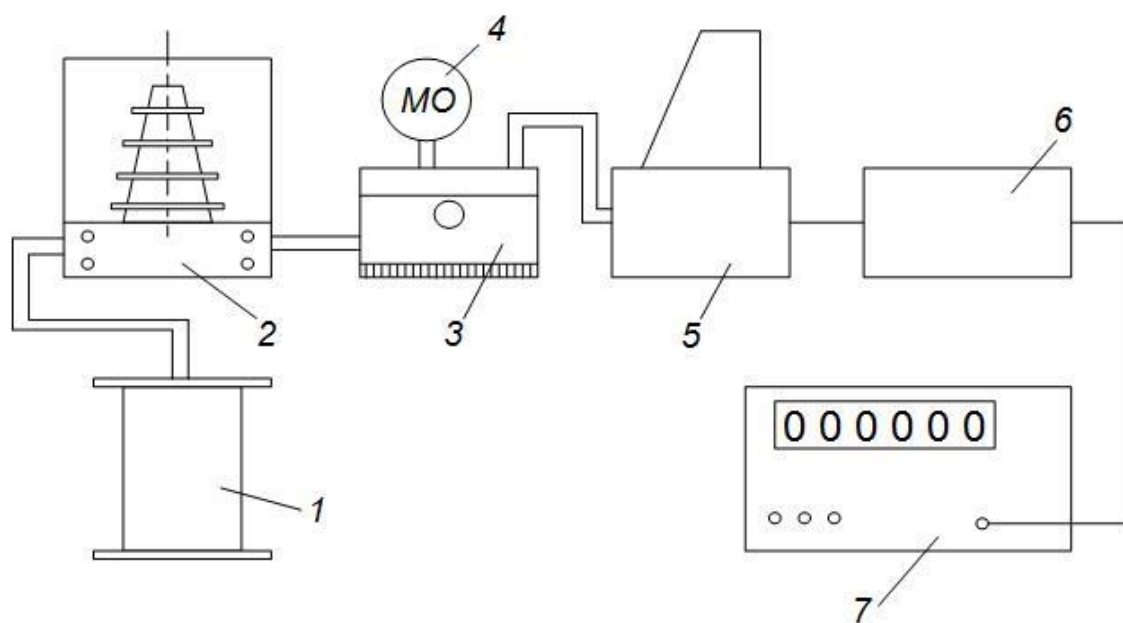


Рис. 10.4. Схема з'єднання приладів: 1 - ресивер; 2 - вантажопоршневий задавач тиску АЗТ; 3 - блок керування АЗТ; 4 - зразковий манометр; 5 - ВПТ; 6 - підсилювач УП-20; 7 - міліампервольтметр ВК-2-20

10.3. Методичні рекомендації до виконання лабораторної роботи

Градуювання компенсаційного ВПТ доцільно проводити в такій послідовності.

Згідно зі схемою, показаної на рис. 10.4. з'єднати прилади, що входять в обладнання лабораторної роботи.

Підключити до електромережі (220 В, 150 Гц) такі пристрої і прилади: компенсаційний ВПТ; блок керування АЗТ; міліампервольтметр.

Включити АЗТ, ВПТ, ВК-2-20.

Провести установку нулів ВК-2-20,

Встановити АЗТ в ручний режим роботи.

Задати тиск в прямому і зворотному напрямках до 10^5 Па с інтервалом $0,1 \cdot 10^5$ Па.

Вимірювати за допомогою ВК-2-20 вихідні сигнали ВПТ.

Перевести АЗТ в автоматичний режим.

Задати тиск 10^5 Па с інтервалом $0,1 \cdot 10^5$ Па в прямому і зворотному напрямках.

Вимірювати за допомогою ВК-2-20 вихідні сигнали ВПТ.

Вимкнути і від'єднати прилади від електромережі.

Загальна кількість циклів вимірювань (прямий-зворотний хід) має дорівнювати трьом.

Таблиця 10.1

Результати вимірювань

Р кгс/см ²	Показання ВК-2-20, мА					
	1 – й цикл		2 – й цикл		3 – й цикл	
	Пр. хід	Зв. хід	Пр. хід	Зв. хід	Пр. хід	Зв. хід
0						
0,1						
0,2						
...						
1						

Результати вимірювань повинні бути оброблені методом найменших квадратів (див. Додаток А) і представлені у вигляді графіка $J_p = f(P)$.

При аналізі результатів вимірювань доцільно побудувати графік залежності

$$\Delta J_k = J_p(P_k) - J_{cpk},$$

де $J_p(P_k)$ - сила струму, отриманого при розрахунку методом найменших квадратів для заваданого тиску P_k ; J_{cpk} - середнє арифметичне вихідних струмів, які отримані при вимірюваннях тиску P_k .

Серед арифметичне J_{cpk} обчислюється за нижче наведеною формулою

$$J_{cpk} = \frac{\sum_{i=1}^n (J_{np.i} + J_{звор.i})}{6},$$

$J_{np.i}$ - вихідний струм при прямому ході; $J_{звор.i}$ - вихідний струм при зворотному ході. Кількість циклів $n=3$, кількість ступенів $k=11$.

10.4. Зміст звіту про виконання лабораторної роботи

1. Мета роботи.
2. Короткі відомості про компенсаційні електричні ВПТ і АЗТ.
3. Завдання
4. Робоча схема.
5. Результати вимірювань і обчислень.

10.5. Контрольні питання

1. Як необхідно змінювати чутливість ланок схеми рис. 10.2, щоб загальна чутливість ВПТ збільшувалась?
2. Як впливає похибка чутливого елемента на загальну точність ВПТ при замкнутій і розімкнутій вимірювальних схемах?
3. Чим визначаються діапазон й інтервали між задавальними значеннями АЗТ?
4. Дайте порівняльну характеристику різних видів чутливих елементів (сильфонів, трубок Бурдона, мембран) з точки зору використання їх в компенсаційних ВПТ.

Рекомендована література: [1, 5, 12, 13]

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов.: – М.: Машиностроение, 1981. – 392 с.
2. Балдин А.А., Бошняк Л.Л. Ротаметры.: – Л.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
3. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств.: – М.: Машиностроение, 1976. – 312 с.
4. Выгода Ю.А. Коррекция погрешностей измерительных элементов систем автоматики.: – Пенза, ППИ, 1980. – 68 с.
5. Граменицкий В.Н. Грузопоршневые измерительные приборы.: –М.: Изд-во стандартов, 1973. – 142 с.
6. Гонек Н.Ф. Манометры.: – Л.: Машиностроение, 1979. – 172 с.
7. ГОСТ 15528-86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкостей и газа. Термины и определения.
8. ДСТУ 2687 – 94. Метрологія. Терміни та визначення. – Чинний від 26.07.94. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68 с.
9. ДСТУ 3651.1 – 97. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Похідні одиниці фізичних величин міжнародної системи одиниць та позасистемні одиниці. Основні поняття, назви та позначення. – Чинний від 01.01.97. – К.: Держстандарт України, 1996. – 30 с.
10. Жоховский М.К. Теория и расчет приборов с неуплотненным поршнем.: – М.: Изд-во стандартов, 1966. – 330 с.
11. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.І. Стадник, О.В. Івахів, Г.Г. Бойко, А. Ковальчук; за ред. Є.С. Поліщука – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2008. – 618 с.
12. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количесва.: – Л.: Машиностроение, 1989. – 700 с.
13. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы.: –М.: Энергия, 1978. – 702 с.
14. Проектирование датчиков для измерения механических величин: / Под ред. Е. П. Осадчого. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

ДОДАТОК А

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ З ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Звіт з виконання лабораторної роботи (далі звіт) студенти, які виконали лабораторну роботу і отримали необхідні чисельні результати, готують і оформляють індивідуально.

А.1. Структура звіту:

- титульний аркуш (дивись додаток Б);
- зміст;
- перелік термінів, визначень та умовних позначень;
- мета лабораторної роботи;
- короткі теоретичні відомості, що стосуються основних положень лабораторної роботи;
- схема лабораторної установки та її опис;
- результати вимірювань, включаючи заповненні таблиці та графіки (у тому числі отримані методом найменших квадратів);
- перелік посилань.

А.2. Зміст

До змісту включають:

Перелік термінів, визначень та умовних позначень

Мета лабораторної роботи

1. Короткі теоретичні відомості.
2. Опис лабораторної установки.
3. Робоче завдання.
4. Результати вимірювань

Висновки.

Перелік посилань.

Додатки (по необхідності).

А.3. Загальні вимоги

Звіт слід оформляти на аркушах формату А4 (201x297)мм. Текст розміщується на одній стороні аркуша. Звіт складається, як правило, державною мовою в друкованому вигляді. Доцільно використовувати шрифт Times New Roman, розмір кегля 14, міжрядковий інтервал 1,5 Lines.

Текст слід друкувати, дотримуючись таких розмірів полів: верхнє, лівє та нижнє – 20 мм, правє – 10 мм.

Розділи звіту повинні мати заголовки. Заголовки слід розташовувати посередині рядка та друкувати великими літерами без крапки в кінці, не підкреслюючи.

Відступ абзацу повинен бути однаковим впродовж усього тексту звіту та дорівнювати п'яти знакам.

Перенесення слів у заголовку не допускається.

Відстань між заголовком та подальшим чи попереднім текстом має бути не менше ніж два рядка.

А.4. Нумерація

Сторінки звіту слід нумерувати арабськими цифрами, дотримуючись наскрізної нумерації впродовж усього тексту. Номер сторінки проставляють у правому верхньому куті сторінки без крапки в кінці.

Титульний аркуш звіту включають до загальної нумерації сторінок але номер сторінки не проставляють.

Всі розділи звіту повинні мати послідовну порядкову нумерацію арабськими цифрами з крапкою.

Структурні елементи «ЗМІСТ», «ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ»,

«ВСТУП», «ВИСНОВКИ», «ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ» не нумеруються, а їх найменування є заголовком структурних елементів.

Ілюстрації, таблиці та формули, слід нумерувати арабськими цифрами порядковою наскрізною нумерацією в межах всього звіту.

Номер формули або рівняння зазначають на рівні формули або рівняння в дужках у крайньому правому положенні в рядку.

А.5. Ілюстрації

Ілюстрації (рисунок, графіки, схеми, діаграми та інше) слід розміщувати безпосередньо після посилання на них у тексті вперше або на наступній сторінці. Зображення на ілюстраціях мають бути контрастними і чіткими.

Ілюстрації повинні мати підпис. Підпис до ілюстрації повинен відповідати основному тексту, доповнювати його, але не повторювати. Цифрові та (чи) буквені позначення, наведені на ілюстрації, слід пояснювати або у підпису, або у тексті.

До складу підпису входять:

- слово «Рисунок»;
- порядковий номер ілюстрації;
- риска (-);
- назва рисунка (з великої літери та без крапки в кінці назви).

Приклади підпису:

без експлікації

Рисунок 2 – Принципова схема манометра

з експлікацією

Рисунок 2 – Принципова схема манометра:

1 – мембрана; 2 – корпус; 3 – пружина; 4 – тяга; 5 – стрілка; 6 – шкала.

На всі ілюстрації мають бути посилання в тексті. Ці посилання входять у текст або подаються у круглих дужках.

Приклади посилання на ілюстрацію в тексті:

Лінія 1 – 2 на рис. 3 відображає процес адіабатного стискання.

Лінія 1 – 2 (рис. 3) відображає процес адіабатного стискання.

Основні вимоги щодо виконання графіків – максимальне використання площі графіків, мінімум написів, раціональний вибір масштабів осей координат, використання множників і префіксів для утворення десяткових кратних і часткових позначень одиниць фізичних величин.

Графіки можна виконувати з координатною сіткою чи без неї.

Стрілку, паралельну осями координат, становити не слід. Розгорнуте найменування фізичної величини, якщо немає її буквеного позначення, пишуть вздовж осі з великої літери окремим рядком і відокремлюють від одиниці фізичної величини комою, наприклад **Тиск, Па**.

Безпосередньо графіки наносять або різними лініями (суцільною, штриховою, штрих - пунктирною тощо), або суцільною лінією і нумерують арабськими цифрами, якщо графіки розрізняються за значеннями будь-якого третього параметра (дві відкладені на осях), поряд з графіками замість порядкового номера вказують буквене позначення величини і числове значення цього параметра з одиницею величини.

Експериментальні точки на полі графіків проставляють тільки тоді, коли:

- необхідно показати розкид даних (надійний інтервал);
- наводяться результати експериментів;
- ці точки мають самостійне значення.

А.6. Формули та рівняння

Формули та рівняння розташовують безпосередньо після тексту, в якому вони згадуються, посередині сторінки.

Вище та нижче кожної формули або рівняння повинно бути залишено не менше одного вільного рядка.

Пояснення значень символів та числових коефіцієнтів, що входять до формули чи рівняння, слід наводити безпосередньо під формулою у тій

послідовності, в якій вони наведені у формулі чи рівнянні.

Пояснення значення кожного символу та числового коефіцієнта слід давати з нового рядка.

Перший рядок пояснення слід починати з абзацу словом «де» без двокрапки.

Приклади

“Відомо, що

$$F = k \cdot \Delta l, \quad (3)$$

де F – сила;

k – жорсткість;

Δl – переміщення.”

Переносити частину формули чи рівняння на наступний рядок допускається тільки на знаках виконання операцій, повторюючи знак операції на початку наступного рядка. Коли переносять формули чи рівняння на знакові операції множення, застосовують знак “х”.

При визначені позначень фізичних величин слід керуватися рекомендаціями, що наведені в [5].

А.7. Правила оформлення переліку умовних позначень

Перелік треба друкувати двома колонками: ліворуч за абеткою наводяться позначення, символи, скорочення а праворуч – їх детальну розшифровку.

Незалежно від цього за першої появи цих елементів у тексті звіту повторно наводять їх розшифровку.

ДОДАТОК Б

Приклад оформлення титульного аркушу

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
імені Ігоря Сікорського**

Кафедра Приладобудування

Звіт

з виконання лабораторної роботи №3

**Вивчення та градування вимірювального перетворювача
різниці тисків**

Дисципліна: Інформативність фізичних процесів

Студент: Ходячий В.В., гр. ПІ – 61м

Викладач: доцент Нікітін О.К.

Київ – 2016

ДОДАТОК В

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕМПІРИЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МЕТОДОМ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ

При експериментальному вивченні функціональної залежності однієї величини y від іншої величини x проводять ряд вимірювань величини y при різних значеннях величини x . Результати вимірювань можуть бути надані на графіку у вигляді точок $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$.

Ставиться завдання підбору формули, яка описує результати експерименту. Особливість завдання полягає в тому, що наявність випадкових помилок вимірювання робить недоцільним підбір такої формули, яка точно описувала б всі доцільні значення. Іншими словами, графік, підібраний відповідно формулі, не повинен проходити через всі експериментальні точки. Для зниження впливу помилок, виконують велике число вимірювань.

Запишемо обрану функціональну залежність у вигляді:

$$y = f(x, a_0, a_1, \dots, a_n), \quad (\text{B.1})$$

де x – незалежна змінна; a_0, a_1, \dots, a_n – постійні параметри.

Постійні параметри невідомі і підлягають визначенню. Для їх визначення проводиться ряд вимірювань величин x і y . Підставляючи їх в рівняння (B.1) отримаємо рівняння виду:

$$y_i = f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m), \quad (\text{B.2})$$
$$i = 1, 2, \dots, n$$

де x_i і y_i – відповідні один одному виміряні значення, n – число вимірювань.

Якби значення x і y знаходились точно, то для опису $m + 1$ параметра досить було б зробити $m + 1$ вимірювань. Насправді, значення x і y містить випадкові помилки, тому мова може йти тільки про отримання "досить хороших" оцінок шуканих параметрів. Іншими словами, необхідно знайти найбільш ймовірні значення невідомих параметрів. Ці ймовірні значення будуть тим більш близькі до дійсних, чим більше число виконаних спостережень.

Так як рівняння (В.2) задовольняється неточно, то матимемо:

$$y - f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m) = \delta_i,$$

де δ – відхилення виміряних значень y_i від обчислених за формулою (В.2).

Принцип найменших квадратів стверджує, що наймовірнішими значеннями параметрів будуть такі, при яких сума квадратів відхилень δ_i буде найменшою, тобто:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, a_0, a_1, \dots, a_m)]^2 = \min \quad (\text{В.3})$$

Розглядаючи a_0, a_1, \dots, a_m , як незалежні змінні і прирівнюючи до нуля частинні похідні від лівої частини по цим змінним, отримаємо $m + 1$ рівняння з $m + 1$ невідомими. Якщо в емпіричну формулу (.1) параметри входять лінійно, то система рівнянь, що отримується після диференціювання, також буде лінійною. Так як рішення лінійної системи значно простіше, ніж нелінійної, слід по можливості перетворювати вибрану емпіричну формулу до такого вигляду, щоб визначувані параметри входили в неї лінійно.

Застосуємо загальні висновки до визначення параметрів деяких залежностей.

Знаходження коефіцієнта лінійної залежності виду $y = a \cdot x$.

Вираз для відхилення має вигляд:

$$y_i - ax_i = \delta_i,$$

$$\sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i)^2.$$

Диференціюючи за a , прирівнюючи до нуля і вирішуючи щодо a , отримуємо:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (\text{B.4})$$

Знаходження параметрів лінійної залежності виду $y = a_0 + a_1 x$.

Вираз, що визначає суму квадратів різниці вимірного значення та розрахованого значення, записуємо у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 = \sum_{i=1}^n \delta_i^2.$$

Продиференціював даний вираз послідовно по a_0 і a_1 і прирівнявши отримані вирази до нуля, отримаємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n y_i x_i \end{aligned} \right\} \quad (\text{B.5})$$

Розв'язуючи дану систему рівнянь щодо a_0 і a_1 , отримаємо:

$$a_0 = \frac{\bar{y} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n y_i x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i}, \quad (\text{B.6})$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \bar{y} \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i}. \quad (\text{B.7})$$

$$\text{де } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i; \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

У багатьох випадках застосування виразів (В.6) та (В.7) призводить до великих чисел, що ускладнює обчислення. Тому доцільно зробити заміну змінних $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$; $\Delta y_i = y_i - \bar{y}$. Значення a_1 і a_0 у цьому випадку визначаються за формулами:

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i \Delta y_i'}{\sum_{i=1}^n \Delta x_i'^2};$$

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x}.$$

При оцінці помилок визначення параметрів a_0 і a_1 розраховують оцінки їх стандартних відхилень S_{a1} і S_{a0} і встановлюють довірливі інтервали:

$$S_{a0} = S \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - n^2 \bar{x}^2}};$$

$$S_{a1} = S \cdot \frac{1}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - n^2 \bar{x}^2}},$$

$$\text{де } S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2}.$$

Інтервали, в яких з установленною ймовірністю α можуть перебувати параметри a_0 і a_1 , записуються у вигляді $a_0 \pm \Delta a_0$, $a_1 \pm \Delta a_1$,

$$\text{де } \Delta a_0 = t_{\alpha, n-2} \cdot S_{a0}; \Delta a_1 = t_{\alpha, n-2} \cdot S_{a1}$$

$t_{\alpha, n-2}$ - коефіцієнт Стюдента для надійності α і значення параметра $n-2$.
Окремі значення коефіцієнтів Стюдента наведені в таблиці В.1.

Значення коефіцієнтів Стюдента

n	α				n	α			
	0,9	0,95	0,99	0,999		0,9	0,95	0,99	0,999
4	2,4	3,2	5,8	12,9	15	1,8	2,1	3,0	4,1
5	2,1	2,8	4,6	8,6	16	1,8	2,1	2,9	4,0
6	2,0	2,6	4,0	6,9	17	1,7	2,1	2,9	4,0
7	1,9	2,4	3,7	6,0	18	1,7	2,1	2,9	4,0
8	1,9	2,4	3,5	5,4	19	1,7	2,1	2,9	3,9
9	1,9	2,3	3,4	5,0	20	1,7	2,1	2,9	3,9
10	1,8	2,3	3,3	4,8	21	1,7	2,1	2,8	3,8
11	1,8	2,2	3,2	4,6	22	1,7	2,1	2,8	3,8
12	1,8	2,2	3,1	4,5	23	1,7	2,1	2,8	3,8
13	1,8	2,2	3,1	4,3	24	1,7	2,1	2,8	3,8
14	1,8	2,2	3,0	4,2	25	1,7	2,1	2,8	3,7